EXPERIMENTELLE PRÜFUNG EINER NEUEN METHODE DER AUTOMATISCHEN PRÄZISIONSWÄGUNG.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

UNIVERSITÄT BASEL

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

VORGELEGT VON

OSKAR BORNHAUSER

AUS BASEL.

WETZIKON

BUCHDRUCKEREI J. WIRZ

1916.

Genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät auf Antrag der Herren Professoren Dr. A. L. Bernoulli :: und Dr. Fr. Fichter. ::

Basel, den 3. Juli 1916.

Fr. Fichter, Dekan.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort	5
I. Literaturübersicht und Einleitung	7
II. Eingrenzung der Möglichkeiten und Darlegung des Prinzips der automatischen Wage	10
III. Beschreibung des Modells und der Ausführung der Wägung	14
IV. Behandlung der Fehler und Eliminierung derselben	16
V. Weitere Messresultate	48
VI. Anhang	50
Schlusswort	52

Vorwort.

Wer immer einmal an einer analytischen Wage gesessen hat, wird wohl bald den Wunsch nach einer einfacheren Methode zur Bestimmung des Gewichtes gehabt haben, sei es aus persönlichen psychischen Gründen oder aus wissenschaftlich-praktischen der Zeitersparnis. Besonders die letzteren sind es, die mich veranlassten, mir die Lösung des Problems der automatischen Wägung mit einer gewissen Berechtigung als Aufgabe zu stellen, ist doch in der analytischen Chemie die gravimetrische Methode, trotzdem sie die fundamentalere ist, gegenüber der titrimetrischen aus obigen Gründen sehr im Nachteil.

Wenn anfangs der einzige leitende Gedanke war, dem Chemiker dieses Hilfsmittel zu verschaffen, so gesellte sich bald eine Hand in Hand mit dem Prinzip gehende Eigenschaft der Wage hinzu, die nun auch den Physiker zu seinem Recht kommen lässt.

Da ursprünglich das Prinzip der neuen Wage sich bedeutend einfacher präsentierte, als es sich im Laufe der Untersuchungen herausstellte, so wurde gleich im Anfang der Typ so festgelegt, dass er als Norm für die Praxis gelten konnte. Besonders wurde auf Handlichkeit als der Grundbedingung für schnelles Wägen ein grosses Gewicht gelegt. Durch die erwähnte Komplikation des Problems kamen dann äusserst langwierige Umbauungen hinzu, die den logischen Aufbau der wissenschaftlichen und konstruktiven Arbeit störend beeinflussten.

Im folgenden ist nun diese Verwirrung gelichtet, insofern die Untersuchungen in logischer Reihenfolge angeordnet sind; am Modell freilich blieb die Disharmonie bestehen, so dass mit einer gewissen Unvollkommenheit des Mechanismus vorlieb genommen werden muss, da eine, rein wissenschaftlich betrachtet, unnö-

tige, langwierige Neukonstruktion aus verschiedenen Gründen, z. B. Unmöglichkeit der Materialbeschaffung infolge des Krieges, nicht durchgeführt wurde.

Für das vorurteilsfreie Entgegenkommen bei dieser selbstgewählten Arbeit, für das Interesse und die Unterstützung bei der Durchführung, speziell auch für die Ueberlassung der privaten Präzisionswerkzeuge bin ich meinem verehrten Lehrer Herrn Professor Bernoulli zu grösstem Dank verpflichtet.

I. Literaturübersicht und Einleitung.

Da ich annehmen konnte, dass eventuelle erfolgreiche Arbeiten auf diesem Gebiet zu praktisch durchgeführten und geschützten Modellen führten, so war auch die darauf bezügliche Literatur nachzusehen. Ich durchsuchte daher die

„deutsche Patentschriftensammlung"

ohne aber Angaben von Belang zu finden.

Reichhaltig dagegen war das Material in der

„Zeitschrift für Instrumentenkunde"

besonders, wenn man alle Arbeiten berücksichtigt, die mit der vorliegenden das gemeinsam haben, eine Wage mit möglichst kleiner Wägedauer zu konstruieren. Automatisch im engeren Sinne wägen diese Vorrichtungen allerdings nicht.

Eigentliche automatische Wagen hingegen sind in der Praxis des täglichen Lebens häufig vorkommend.

Es mögen alle diese Systeme von Schnellwagen in einer kurzen Gegenüberstellung nach ihren typischen Eigenschaften besprochen werden.

a) Gewöhnliche Wagen (Hebelwagen) mit besonderen Vorrichtungen für schnelles Wägen sind die

1. Wagen mit Reiter. Die Milligramme und Bruchteile werden rasch ermittelt durch Verschieben eines kleinen Uebergewichts (Reiter) auf dem geteilten Wagbalken (Reiterlineal).

2. Torsionswagen. Die kleinen Gewichte werden durch die gemessene Verdrehung eines in der Mittelaxe des Wagbalkens liegenden Torsionsdrahtes bestimmt. (Frerichs Torsionswage Z. f. anal. Ch. 1876, Löwenherz Z. J. I.)

3. Wagen mit Vorwagen. Die Vorwage gestattet auf zirka 0,01 g genau den aufzulegenden Restbetrag an Gewicht zu bestimmen, der durch angenäherte Austarierung eines Körpers auf zirka ganze Gramme noch bleibt.

Dieser Rest kann dann sofort aufgelegt und die feineren Gewichte mit dem Reiter bestimmt werden. (Witter, Chem. Ztg., 1898.)

4. Aperiodische Wagen. Die üblichen langen Schwingungen werden durch starke Luftdämpfung rasch verringert.

b) Eigentliche selbsttätige Wagen sind

1. die Federwagen. Sie existieren von den primitivsten Formen und für kleinste Gewichte (horizontaler Quarzfaden, Mikrowage) bis zu komplizierten Formen und für grosse Gewichte (Küchenwage, Personenwage).

2. Winkelhebelwagen, bei welchen ein Winkelhebel (Schwerpunkt tiefliegend) durch das Uebergewicht solange gedreht wird, bis wieder Gleichgewicht herrscht. Die Drehung wird an einer auf Gewichte geaichten Skala abgelesen. Die gebräuchlichste Form ist die Briefwage.

Diese automatischen Systeme erlauben sehr rasche Wägungen, allein die Empfindlichkeit bei grossem Wägebereich ist klein, oder aber, sie besitzen bei hoher Empfindlichkeit einen kleinen Messbereich. —

Für die Arbeit von besonderer Bedeutung sind die

3. Auftriebswagen. An einem Schwimmer hängt eine Wagschale, die vom Auftrieb des Schwimmers getragen wird. Die eine Art der Wägung beruht nun darauf, dass der aufgelegte Körper den Schwimmer bis zu einer gewissen Tiefe einsinken lässt, die nachher mit Gewichten ausgemessen wird. Beim andern Verfahren nimmt man so viel Gewichte von der mit dem Körper überlasteten Wagschale weg, bis der Schwimmer wieder seine, für alle Wägungen gleiche Nullage erreicht hat. Die abgehobenen Gewichte sind gleich dem Gewicht des Körpers.

Die nach diesem System gebauten Wagen dienen besonders zur Bestimmung spezifischer Gewichte und zeigen weder hervorragende Wägeschnelligkeit noch eine grosse Empfindlichkeit. Ihr Hauptvorteil beruht auf der Einfachheit der Handhabung und der relativen Billigkeit bei sehr robuster Konstruktion.

Einzig die Modelle von Lohnstein (Z. f. anal. Ch. 1895, 1913) zeigen gewisse Vervollkommnungen, die

den bei dem System vorkommenden Störungen durch Kapillarität und Temperaturschwankungen Rechnung tragen.

Literatur:

Z. J. = Zeitschrift für Jnstrumentenkunde
Z. f. anal. Ch. = Zeitschrift für analytische Chemie
Chem. Ztg. = Chemiker Zeitung

für die physikalischen Daten

Landolt-Börnstein, Physikalisch-chem. Tabellen 1913
Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik.

II. Eingrenzung der Möglichkeiten und Darlegung des Prinzips der automatischen Wage.

Durch das Studium des im vorigen Kapitel dargelegten Materials wurde es mir bald klar, dass der bis dahin zur Lösung des Problems beschrittene Weg nicht zum Ziele führen kann unter der Voraussetzung, dass man billigerweise den Ausdruck „automatische Wage" nicht für Wagen anwendet, bei denen bis auf 0,01 g herunter manuell gewogen wird, und blos die Bestimmung der ganzen und Zehntelmilligramme auf einfache oder selbsttätige Weise geschieht. Man darf diesen Ausdruck wohl füglich erst dann anwenden, wenn auch die Zehntelgramme innerhalb des automatischen Messbereiches liegen.

Nachdem diese ungefähre obere Grenze festgelegt ist, ist nun zu erweisen, warum diese Grenze überhaupt nicht leicht überschritten werden kann, ohne mechanische (konstruktive) Unmöglichkeiten zu erhalten.

Dies geschieht wohl am besten an Hand von zwei Beispielen.

In beiden Fällen sei der ganze Messbereich (100 g) automatisch, die Empfindlichkeit 0,1 mg.

1. Beispiel;

Eine Federwage nach Art der Jolly'schen hat einen auf $^1/_{100}$ mm geteilten Masstab, und es sei 0,01 mm = 0,0001 g, dann haben 100 g die Länge 10 m.

Die Senktiefe der Schale beträgt 10 Meter, die Feder müsste mindestens 20 Meter lang sein.

Zu dem sehr langen Ablesemasstab kämen als weitere Schwierigkeiten die thermischen und unkontrollierbaren Fehler im Zustand der Feder.

2. Beispiel:

Eine Torsionswage (nach den Daten eines von Ritchie hergestellten Fadens) hätte eine Fadenlänge von

6 m (100 g) wenn die Trommel auf Hundertstel geteilt wäre. Würde man die Teilung auf Tausendstel verfeinern, so bliebe doch noch eine Fadenlänge von 60 cm und 100 Rotationen der Trommel für 100 g.

Als Fehlerquelle träte hier besonders auf die elastische Nachwirkung.

Schon die rohe Betrachtung der beiden angeführten Beispiele, die sich noch sehr vermehren liessen, zeigt, dass es besonders die Dimensionen sind, die eine für den ganzen Messbereich selbsttätige Wage unausführbar oder wenigstens unverwendbar machen, ausserdem erreichen bei solcher Wägungsart stets irgend welche Fehler enorme Werte.

Daraus ergibt sich nun die Notwendigkeit einer neuen Wägemethode; ich nenne sie Differenzenwägung. Die Differenzenwägung ist nahe verwandt mit der Substitutionswägung, der Unterschied ergibt sich aus der Gegenüberstellung beider sofort.

Die Substitutionswägung ermittelt das Gewicht dadurch, dass die bewegliche mit Substitutionsgewichten versehene Aufhängung des zu wägenden Körpers so lange entlastet wird, bis sie in eine für alle Wägungen gleiche Nullage zurückkehrt. Die abgehobenen Gewichte sind gleich dem Gewicht des Körpers.

Die Methode kann bei der Konstruktion der Wage eine bedeutende Vereinfachung bieten, eine Abkürzung der Wägedauer wird nicht erreicht.

Im weiteren Sinne ist auch die Wägung an der zweiarmigen Hebelwage eine Substitutionswägung, nur dass die Gewichte aufgelegt werden und dass die Nullage durch Schwingungen ermittelt wird.

Bei der Differenzenwägung nun bestimmt man das Gewicht eines Körpers dadurch, dass die überlastete Wagschale durch eine beliebige, aber genau bekannte, dem Gewicht des Körpers nahekommende Gewichtsmenge entlastet wird, während der Rest, die Differenz zwischen wahrem und abgehobenen Gewicht auf irgend eine Weise gemessen wird, was bei dem kleinen Intervall von vielleicht 1 g leicht und einfach selbsttätig geschehen kann.

Auf die Methode ist die neue Wage aufgebaut. Geleitet durch die mannigfaltigen Fehler, die sämtlichen Wagesystemen anhaften und die einerseits vom Material abhängen, wie bei Torsions- und Federwagen, oder

aber von dessen Bearbeitung, wie bei Hebelwagen mit ihrer Reibung, Masse, Ungleichheit der Hebelarme, Nichtparallelität der Schneiden, Durchbiegung u. s. f. versuchte ich eine Einrichtung zu finden, die augenscheinlich einem theoretisch-mechanischen System praktisch sehr nahe kommt. Anhaltspunkte gaben mir die manigfaltigen Formen von Auftriebswagen.

als Gewichts- und Skalenaräometer und

die Mohr'sche Wage.

Es resultierte unter Berücksichtigung der praktischen Durchführbarkeit folgendes

Prinzip der automatischen Wage

Fig. 1.

An einem Schwimmer S vom Auftrieb A_0 hängt die Wagschale vom Gewicht W, das, zusammen mit dem Gewicht G der Subtraktionsgewichte dem Auftrieb A_0 das Gleichgewicht hält. Die Eintauchtiefe, an einer Skala Sk ablesbar, beträgt alsdann o.

Man bringt jetzt auf die Wagschale den zu wägenden Körper $(K+k)$, wobei K den grössten Teil des Gewichtes repräsentiert (meistens die ganzen Gramme), während k das Restgewicht (meistens die Bruchgramme) vorstellt. K wird durch eine rasche Vorwägung vielleicht auf ein Gramm genau festgestellt. Diese Vorwägung ist nicht unbedingt nötig, sie gestattet aber gegenüber dem Ausprobieren eine grosse Zeitersparnis, besonders wenn sie selbst automatisch, z. B. auf einer Briefwage vorgenommen wird. —

Das Gewicht W der Wagschale plus dem Gewicht G ist gleich der Konstanten A_0 (Auftrieb bei der Nullage.) Man nimmt nun von $(G+W)=A_0$ das Gewicht K weg. Die Kraft, die jetzt den Schwimmer aus der Gleichgewichtslage O treibt, ist

$$(K+k)-K=k$$

Wie man sieht, kommen in der Gleichung die Grössen W und A_0 nicht mehr vor, was sich aus folgender Ueberlegung leicht ergibt. Wir denken uns den Schwimmer

zerlegt in zwei Teile. Der eine hält ein für alle mal dem Eigengewicht W der Wagschale das Gleichgewicht, während der andere G kompensiert. —

Die Kraft k (Restgewicht) ist bestrebt, den Schwimmer S tiefer einzutauchen. Dieser Schwimmer trägt an seinem obern Ende den Draht D, der aus der Flüssigkeit herausragt. Ein weiteres Eintauchen vergrössert den Auftrieb, der Schwimmer wird also so weit eintauchen, bis die Auftriebszunahme gleich k ist.

Die Zunahme A_z berechnet sich nach

$$V_z \cdot s = A_z \text{ , wobei}$$

V_z das neu eintauchende Volumen des Drahtes und s die Dichte der Flüssigkeit ist.

Ist der Draht zylindrisch, so ist

$$A_z = q \cdot l \cdot s \quad \text{wobei}$$

tq der Querschnit und l die Eintauchlänge des Drahtes ist, d. h.

Die Eintauchtiefe ist direkt proportional dem Auftriebszuwachs und da

$$A_z = k \quad \text{auch}$$

direkt proportional dem Restgewicht k.

Ist der Masstab nach Gewichten geaicht, so ist

K + l das Gewicht des Körpers.

Man ersieht also schon aus dieser theoretischen Betrachtung die sich aus der Methode ergebende Schnelligkeit der Wägung, bestehend aus Aufsetzen des Körpers, Abheben eines innerhalb gewissen Grenzen beliebigen Gewichtes K.

Die Wage stellt sich selbst auf l ein.

Addition K + l gleich Gewicht.

Dies sind die notwendigen Manipulationen. Man ersieht weiter, dass für den ganzen Wägebereich, der in den durch die Materialfestigkeit bedingten Grenzen schwanken kann, die Empfindlichkeit der Wage die gleiche bleibt.

Die einzige Schwierigkeit der Konstruktion liegt in der gleichmässigen Herstellung des Schwimmerdrahtes, was in den benützten Grenzen keine Unmöglichkeit ist.

Diese Annäherung an diese einfache Theorie schwindet aber beträchtlich, sobald man die äusseren Bedingungen, denen das System unterworfen ist, als inkonstant annimmt, was in der Praxis leider der Fall ist.

Es ergab sich daher eine weitere wichtige Arbeit, die in der qualitativen und quantitativen Erforschung der Fehler und in der Auffindung von Mitteln besteht,

die die ersteren auszugleichen haben. Bevor jedoch darauf eingetreten werden soll, ist es zweckmässig, das vorhandene Modell in den Grundeigenschaften vorzuführen, umsomehr, als es von dem zukünftigen Modell der Praxis, was Handlichkeit und Aeusseres anbetrifft, nicht allzuweit abweicht.

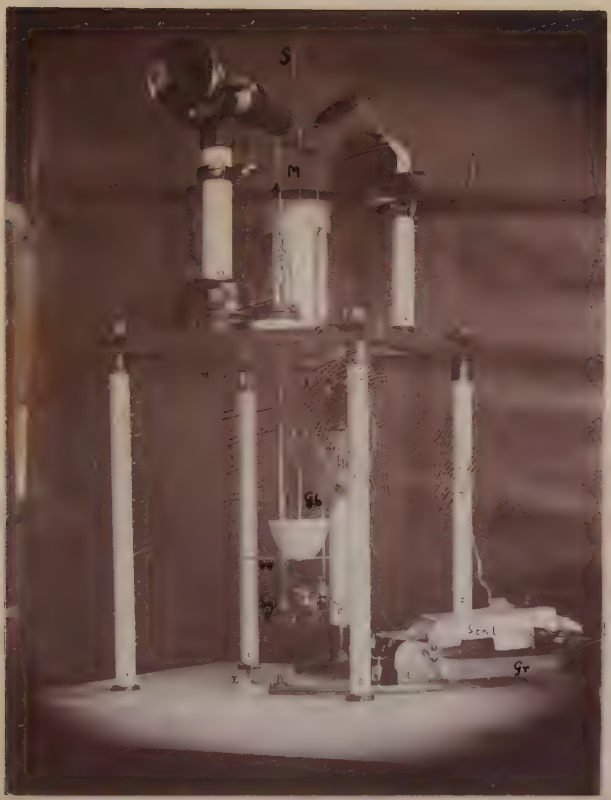
III. Beschreibung des Modells und der Ausführung der Wägung.

Die Photographie zeigt die Wage ohne das Gehäuse. Das daran befindliche Mikroskop-Okular ist darum nicht sichtbar. Ausserdem sind die Arretierungsvorrichtungen der Uebersichtlichkeit halber etwas vereinfacht. —

Auf einer soliden Marmorplatte, die von drei kräftigen Fusschrauben getragen wird, (in der Figur nicht mehr sichtbar), stehen vier Träger (1, 2, 3, 4), welche die Glasplatte (G) tragen. Der Raum unterhalb der Platte ist der Wägeraum. Auf der Glasplatte steht das Quecksilbergefäss (Hg), welches den Schwimmer enthält. Aus ihm heraus sieht man den Senkdraht (Messingdraht) (M) ragen, auf dem die Skala (S) befestigt ist. Ausserdem ist er noch mit den abwärtsführenden Aufhängungen (A) für die Wagschale verbunden. Diese Aufhängungen werden durch Führungen (F) orientiert. Zur Ablesung dient das Mikroskop (Mi) mit einer breiten Blende am Okularende zum Schutze gegen seitliches Licht.

R ist der Reinigungsapparat für das Quecksilber; er ist zwangsläufig mit der Arretierungsvorrichtung verbunden, sodass bei jeder Arretierung die Reinigung vollzogen wird.

Unterhalb der Glasplatte ist die Wagschale, bestehend aus einem treppenförmigen Teil zur Aufnahme der Subtraktionsgewichte (Sg) und einer Vorwage nach Art der Winkelhebelwagen. Diese Vorwage gestattet auf einem Gradbogen (Gb) die ganzen Gramme des auf die eigentliche Wagschale (W) aufgelegten Körpers (in der Figur der Tiegel) abzulesen.


S
M
Gb
Scal
Gr

Die von der Vorwage angegebene Anzahl Gramm ist mit Tasten (T) abgehoben und durch Herausdrehen am Griff (Gr) des Schlittens (Schl) weggefahren worden. Die Wagschale hat sich, durch die gleichzeitig bewirkte Auslösung der Arretierungen (I, II, III) freigelassen, in die Schwebelage begeben, die sie jetzt einnimmt.

Wird der Schlitten zurückgeführt, so wird die Wagschale durch die Arretierungen auf die tiefste Lage heruntergedrückt. Die Gabeln II und III fixieren die Gewichtsschale in Bezug auf den Schlitten. Dieser fährt die abgehobenen Gewichte an ihre leeren Plätze; ein Druck auf den Griff stellt sie wieder auf die Gewichtsschale.

Damit ohne Mühe und Zeitverlust die verlangte Anzahl Gramm abgehoben werden kann, ist die Tastervorrichtung so eingerichtet, dass zwei Reihen Taster zu je neun Tasten die Einer- bezw. Zehnergewichte besorgen. Die Anzahl der Gewichte ist die nach üblichen Grundsätzen verlangte minimale,

nämlich ein Gewicht à 50 g
ein Gewicht à 20 g
zwei Gewichte zu { 10 g, 10 g }

und ein Gewicht à 5 g
ein Gewicht à 2 g
zwei Gewichte à { 1 g, 1 g }

Ihre Summe ist also 99 g.

Um nun irgendwelche Kombination dieser Gewichte zu erhalten, hat man vermöge der besonderen Einrichtung des Tasterwerks nicht nötig die kombinierenden Gewichtsstücke einzeln abzuheben, sondern man drückt einfach die nötige Zehner- und Einertaste nieder.

Ist z. B. das Gewicht 98 g abzuheben, so drückt man auf die Taste 90 der Zehnerreihe, und die Taste 8 der Einerreihe. Der Mechanismus besorgt dann von selbst das Abheben

von $50 + 20 + 10 + 10$ und
$5 + 2 + 1$

Im folgenden sei eine Wägung nach ihrer Zeitdauer hin erläutert. Obschon die Wage als Modell die gewünschte Empfindlichkeit auf 0,1 mg noch nicht zeigt, nimmt das Ablesen eines falschen Gewichtes

auf diese Genauigkeit natürlich gleichviel Zeit weg, wie das Ablesen des eventuellen genauen Gewichtes, so dass die hier angeführte Zeit doch typisch ist.

Aufsetzen des Körpers, Ablesen des Subtraktionsgewichtes auf der Vorwage	5 Sek.
Abheben dieses Gewichtes und Auslösen	5 Sek.
Die Wage stellt sich ein auf ihre Gleichgewichtslage (durch starke Dämpfung schneller) in	10 Sek.
Ablesen des Skalenstandes	10 Sek.
Arretieren und Wegheben des Körpers, Abstellen der Gewichte	5 Sek.
Ablesen des Gewichts auf der Tabelle, Addieren zum Hauptgewicht	15 Sek.
Wägedauer	50 Sek.

IV. Behandlung der Fehler und die Eliminierung derselben.

Es ist eine grosse Zahl von Einflüssen, die das System bald gesetzmässig und quantitativ fassbar, bald auch nur qualitativ schätzbar beeinflussen.

Die folgende Tabelle zeigt dieselben zu einer Uebersicht geordnet und gibt zugleich den für die Untersuchung einzuhaltenden Weg an.

	Art der Behandlung
1. Einfluss von Material und Bauart	qualitativ
2. Spez. Behandlung der optischen Konstruktion	qualit. & quant.
3. Allg. statistische und dynamische Störungen	qualit.
4. Einfluss der Oberflächenspannung	qualit-quant.
5. Temperatureinflüsse	qualit.-quant.
6. Magnetische und elektrische Störungen	qualit.
7. Luftwirkungen	qualit. & quant.
8. Einfluss der Gravitation	quantitativ

1. Einfluss von Material und Stabilität.

Bei einer Konstruktion hat man sich zu Beginn Rechenschaft zu geben über die Art des Materials, das nach Stärke und Beständigkeit den gestellten Anforderungen genügen muss.

Bei der Wahl der Flüssigkeit ging ich von rein praktischen Ueberlegungen aus und wählte das Quecksilber.

Das Quecksilber gestattet infolge seiner hohen Dichte eine entsprechende Reduktion des Volumens der ganzen Wage, insbesondere des Schwimmers und des Flüssigkeitsbehälters. Seine Daten sind mit grösster Genauigkeit bekannt. Seine Wärmeausdehnung ist relativ regelmässig.

Als typische Eigenschaft ist hervorzuheben seine kapillare Depression, die sich für den gegebenen Fall dadurch wertvoll erwies, als keine Adhäsion am Schwimmerdraht stattfindet, wodurch kein Abfliessen bei einer Verschiebung desselben notwendig wird. Sie äussert sich also in einer Zeitersparnis beim Wägen. Obschon diese Eigenschaft aus obigem Grunde schätzbar ist, brachte sie in die ganze Arbeit eine grosse Komplikation, die allerdings auch die Ursache weiterer Untersuchungen wurde, die möglicherweise anderweitige wertvolle wissenschaftliche Resultate zeitigen werden. —

Durch die Wahl der Flüssigkeit waren auch enge Grenzen gezogen für diejenigen Teile, die mit ihr in direkter Berührung stehen. Eine Amalgamation oder sonstige gegenseitige Beeinflussung musste von vornherein ausgeschlossen werden. Aus Konstruktionsgründen liess sich Metall kaum umgehen. Da aber auch den im Abschnitt 5 verlangten Bedingungen genügt werden musste, so wurde als Material für den Schwimmer Aluminium gewählt, obschon dieses Metall sich nach dem Augenschein nicht besonders widerstandsfähig zeigt.

Ritzt man z. B. bei Gegenwart von Quecksilber die Oberfläche eines Aluminiumstückes, so wachsen mit sichtbarer Geschwindigkeit grasartige Gebilde von $Al(OH)_3$ heraus, das Stück fällt der Zerstörung anheim. Eine Verletzung der Oberfläche kann auch durch Wasser erfolgen, weshalb auch dieses für den gegebenen Fall vermieden wird. Ist hingegen die Oberfläche vor Verletzung geschützt, so können beide Metalle ohne merkliche Beeinflussung nebeneinander bestehen, was durch folgende Kontrollversuche bewiesen wurde.

Die Oberfläche des Aluminiums wurde relativ gross gewählt, um kritisch zu arbeiten.

Gewicht je eines Aluminiumbleches von ca. 1 cm² Oberfläche neben und in Quecksilber aufbewahrt während		
	t = 23°	t = ca. 13°
1	0,2863 g	0,2601 g
2	0,2862	0,2601
3	0,2862	0,2599
4	0,2862	0,2600
5	0,2863	0,2601
10 Tagen	0,2863	0,2601

Um aber ganz sicher zu gehen, wurden qualitativ noch folgende Prüfungen vorgenommen. Ein Al-Stück frisch und roh abgedreht zeigt bei der Berührung mit Hg sofort Oxydation. Ein glatt abgedrehtes und poliertes Stück gab nur an einer Stelle die Oxydation. Gleiche Stücke, aber älter, zeigen keine Beeinflussung mehr. Es scheint also die Empfindlichkeit von Vorhandensein einer Oxidhaut abhängig zu sein.

Der zweite Teil des Schwimmers soll nun aus einer Substanz gebildet werden, die sich stärker ausdehnt, als Hg (siehe Abschnitt 5).

Leider sind unter den festen Körpern nur sehr wenige, die eine so hohe Ausdehnung zeigen.

Nach der Sichtung in Kapitel 5 blieben nur noch Paraffin und Hartgummi.

So angenehm sich Paraffin in Bezug auf Formgebung anfangs erwies, musste es doch im Laufe der Untersuchung durch Hartgummi ersetzt werden. Es zeigte sich nämlich, dass bei dem Eintauchen des Schwimmers in das Quecksilber hartnäckig Luftblasen mitgerissen werden, die natürlich die ganze Einrichtung äusserst ungenau gestalten. Ich suchte die Störung zu beseitigen, indem ich auf den Deckel des Quecksilbergefässes einen Helm mit Hahn aufschliff, der evakuiert werden konnte. Doch gelang das Verfahren nur unvollständig. An ein Auskochen wie bei Barometerfüllungen ist natürlich nicht zu denken, aber auf folgende einfache Weise fand sich die Lösung:

Vor dem Eintauchen wird das Quecksilber mit einer leicht verdunstenden Flüssigkeit (Aether, Benzol) überschichtet. Der eintauchende Körper zieht einen

dünnen Flüssigkeitsmantel mit sich hinunter, der allmählich verdampft, wobei sich das Quecksilber blasenlos dem Schwimmer anschmiegt. Die erwähnten Flüssigkeiten zeigten aber eine grosse Lösungsfähigkeit für Paraffin, so dass ein Teil desselben aufgelöst wurde und der Verdampfungsrückstand eine Verunreinigung des Quecksilbers und Messdrahtes erzeugte.

Längere Versuche, die Paraffinschicht durch einen Lacküberzug zu schützen, führten zu keinem brauchbaren Resultat, so dass ich mich endgültig für die Verwendung von Hartgummi entschied. —

War schon beim Paraffin der Mangel an genau bezeichnenden Angaben unangenehm, so war es noch viel mehr beim Hartgummi. Es wäre dringend zu wünschen, dass bei der schwankenden Zusammensetzung solcher Körper in den Tabellen der physikalischen Daten mindestens die Provenienz, der Handelsname oder sonstige definierende Angaben gemacht würden, um den Körper, für den die oft sehr genauen Daten gelten, in der grossen Reihe ähnlicher wiederzufinden. Ich benützte nun die Daten, die mir „Landolt-Börnstein“ bot.

Um die Exhalation von Schwefel zu mildern, überzog ich den ganzen Schwimmkörper mit einer Lackschicht. —

Der Messdraht (Senkdraht) muss aus Stahl bestehen, um trotz seiner Dünnheit (D = 1,5 mm) die Wirkung und Gegenwirkung (360 g) von Auftrieb und Gewicht ohne Gefahr auszuhalten.

Die genannte Dicke ist das Ergebnis von praktischen Erfahrungen, die ich am Modell machte. Ein Draht von 1 mm Durchmesser war bei gegebener Länge nahe am Durchbiegen oder Brechen.

Da direkt die Empfindlichkeit des Systems vom Querschnitt des Drahtes abhängt (siehe aber unter Anhang), dieser wiederum vom Gewicht des ganzen beweglichen Teiles, insbesondere vom Messbereich (Subtraktionsgewichte), so war natürlich die möglichste Erleichterung von vornherein geboten. Auch hier, für die äussern Teile schien mir ursprünglich Stahl vermöge seiner hohen Festigkeit geboten, doch beeinflussten seine magnetischen Eigenschaften das System sehr unvorteilhaft, so dass für spätere Spezialuntersuchungen Neukonstruktionen provisorischer Art notwendig wurden.

Zukünftig soll aber konsequent nur noch unmagnetisches Material verwendet werden, wieder besonders Aluminium.

Alles übrige Material war nach den Regeln der praktischen Mechanik gewählt.

2. Spezielle Behandlung der optischen Konstruktion.

Da die Verschiebungen, die der Draht durch die kleinen Gewichte, die mit der Wage noch bestimmt werden, erfährt, ausserordentlich klein sind (0,1 mg = 0,004 mm), so wurde ein Ablese-Mikroskop notwendig.

Obschon hier lediglich konstruktive Arbeiten und Ueberlegungen geleistet wurden, resultierten doch einige Ergebnisse, die, weil auch für die praktische Physik von Nutzen, hier veröffentlicht werden mögen.

Die ganze optische Einrichtung besteht einerseits aus der Skala, die am Schwimmerdraht in dessen gradliniger Verlängerung befestigt ist, und aus dem Ablesemikroskop mit der Nullmarke.

Da mir die Abneigung der Chemiker gegen den Nonius bekannt war und ausserdem im gegebenen Fall ein solcher kaum Anwendung finden könnte, so wäre ich genötigt gewesen, bei Benützung eines einfachen Fadens als Nullmarke eine tausendstrichige Skala herzustellen. Diese wäre, weil recht unübersichtlich, die Ursache einer grossen Zahl von Ableseirrtümern gewesen.

Die Lösung fand ich nun mit folgender Ueberlegung.

Ist auf einer Skala, wie im gegebenen Falle, der hundertste Teil der Skalenteile abzulesen, so benötigen wir im Allgemeinen den Nonius, der hier auf 99 Skalenteile 100 Noniusteile enthält. Die Länge des Nonius ist also 99 Skalenteile. Teilen wir aber die Hauptskala nochmals in zehn feinere Unterteile, so lässt sich der Nonius auf einen Zehnernonius von der Länge $^{9}/_{10}$ des Hunderternonius reduzieren. Mit der Feinheit der Teilung wachsen aber auch die Schwierigkeiten der Herstellung, was sich besonders im Preis geltend macht.

Ich habe nun einen groben Masstab. An (siehe Fig. 2) oder auf ihm gleitet ein kleiner Masstab, dessen Länge gleich einem Intervall des groben Masstabes ist. Dieser kleine Masstab ist in zehn Teile geteilt. Nehme ich nun z. B. den obersten Teilstrich des kleinen Masstabes als Nullstrich (Faden) an, so repräsentiert

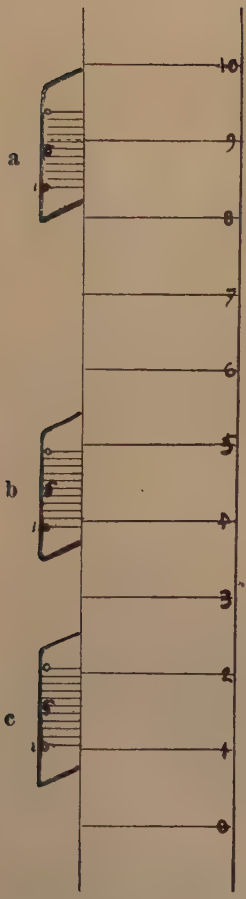


Fig. 2.

seine nicht genau abzulesende Lage auf dem grossen Masstab die jeweilige Länge. Ablesen kann man sicher nur die Zahl ganzer Intervalle der grossen Skala. Nun zeigt aber der letzte mitgerechnete Teilstrich der grossen Skala auf einen bestimmten Punkt der kleinen Skala den man leicht auf $^1/_{10}$ dieser Skala genau abschätzen kann. Der Nullstrich steht also um diese auf dem kleinen Masstab abgeschnittene Strecke höher als der letzte mitgerechnete Teilstrich. Diese Strecke ist also zur Zahl der ganzen Intervalle zu addieren.

An Hand der drei auf der Tafel angeführten Beispiele sei dies hier näher erörtert.

a) Es ist zu bestimmen die Lage des Teilstriches o der kleinen Skala auf der grossen.

Sie ist 9, plus eine unbekannte Zahl Zehntel und Hundertstel des Skalenintervalles.

Der Strich 9 der grossen Skala steht nun auf 8,8 der kleinen Skala. Um diese Strecke steht also der Nullstrich der kleinen Skala höher als 9,00. Wir addieren also diese Strecke zu 9,00. Die wirkliche Lage des Nullstriches der kleinen Skala ist also

9 Ganze plus 8,8 Zehntel
oder 9,88.

Die beiden anderen Beispiele zeigen
b) die Werte 4,93 und
c) 2,06

Tritt schon durch diese Beispiele die Einfachheit der Ablesung klar zu Tage, so gesellt sich dazu der grosse Vorteil, dass man eventuell nicht genau richtig geteilte Masstäbe anwenden kann, wenn nur die Fehler desselben durch eine Kontrollmessung bekannt sind. Natürlich muss dann der kleine Masstab z. B. auf 11 mittlere Zehntel des grossen Intervalles verlängert sein.

Bei einem Noniusmass ist eine solche Verwendung unregelmässiger Massstäbe ausgeschlossen, weil ja die Ermittlung der Unterteile durch Koinzidenz erfolgt.

Nach diesem Prinzip wurde die Skalenteilung ausgeführt. Da mir keine Teilmaschine zur Verfügung stand, insbesondere auch, da die gewöhnlicheren nicht diese feinen Striche zu ziehen gestatten, die hier verlangt sind (Strichdicke 0,004 mm), so stellte ich mir selbst die Teilvorrichtung her mit Hülfe eines Präzisionskatasters der Firma P. Roche in Rolle, das 0,01 mm abzulesen gestattet. Am beweglichen Schlitten wurde ein fein eben geschliffener Anschlag angebracht, an welchem von Hand ein zweiter geführt wurde, der genau eingespannt das feine Messer (Gilletteklinge) enthielt. Eingeritzt wurde die Skala in einen versilberten Glasstreifen, sodass sich die Striche in der Durchsicht als hell auf dunklem Grunde zeigen. Die Striche haben die mittlere Distanz 0,4 mm.

Da sich bei der Ausmessung im Mikroskop zwecks Herstellung einer Korrekturtabelle ziemliche Unregelmässigkeiten zeigten, deren Ursache wahrscheinlich Ermüdungserscheinungen beim Einstellen des Nonius sind, so teilte ich die kleine Skala (Strichdistanz 0,04 mm) mit einer Schraubenlehre, bei der man mit grosser Genauigkeit auf 0,01 mm einstellen konnte. Auf dem Zentrum der Schraubenspindel ruhte eine horizontale 3 m lange Eisenstange mit einer feinen Spitze am Ende auf. Das andere Ende war fest im Schraubstock eingespannt. Nahe der Spitze war wieder der Anschlag befestigt. So gelang mir mit grosser Präzision die Teilung von 0,4 mm in zehn Teile.

Waren so die Skalen hergestellt, so handelte es sich nur darum, wo die feine Skala angebracht werden soll. Direkt neben der grossen Skala war nicht möglich wegen der auftretenden Hemmung. Auch die übliche Anordnung im Okular war nicht angängig, weil das Okular ausserhalb des Wagengehäuses liegt und mit dem Objektiv keine direkte, also unverrückbare Verbindung besitzt. Jede gegenseitige Verschiebung hätte aber bedeutende Fehler zur Folge.

Ich löste die Sache dadurch, dass ich das halbe Objektiv durch einen Metallspiegel (oder total-refl. Prisma) abdeckte, dessen spiegelnde Fläche unter 45° zur Mikroskopaxe dicht vor dem Objektiv steht und die

Strahlen von der Schwimmerskala in das Mikroskop wirft. Vor der nicht abgedeckten Hälfte des Objektivs steht die feine Skala in derselben Distanz wie die Schwimmerskala via Spiegel. In der Bildebene erscheinen nun beide Skalen neben- bezw. übereinander.

Der Vorteil, den die Einrichtung bietet, ist der, dass eine Parallaxe nicht eintritt und dass alle Erschütterungen des Okulars, die sich beim Ablesen und Manipulieren am Gehäuse nicht vermeiden lassen, ganz ohne Einfluss sind. Um die Teilstriche der beiden Skalen voneinander zu unterscheiden, werden sie mit verschiedenfarbigem Licht durchleuchtet. Am Modell musste ich künstliches Licht anwenden, weil die Objektivlinsen ziemlich kleine Oeffnung besitzen: in der Praxis wird man mit Tageslicht oder Raumbeleuchtung auskommen.

Als Fehlerquelle kommt hier in Betracht, richtige Skala vorausgesetzt, die Verschiebung der Skala in der Richtung zum oder vom Objektiv. Dadurch entstehen Unschärfen, die natürlich ein genaues Ablesen verunmöglichen. Die Eliminierung dieses Fehlers wird dadurch erreicht, dass die Skala peinlich genau normal zur Flüssigkeitsoberfläche steht und dass ausserdem das ganze System eine reibungslose Führung erhält, die in Abschnitt 3 erläutert wird.

3. Statische und dynamische Störungen.

Die typische Eigenschaft der neuen Wage ist die, dass sie statisch wägt, d. h. sie nimmt für jedes bestimmte Uebergewicht eine bestimmte, zugehörige Lage ein, die Gleichgewichtslage, die erst abgelesen wird, wenn das System zur Ruhe gekommen ist. Als Fehler müssen alle Einflüsse gelten, die diese Gleichgewichtslage so beeinflussen, dass sie nicht mehr typisch ist für die zugehörige Belastung.

Durch rohe Betrachtung kommt man leicht zum Schluss, dass beim vorliegenden Prinzip dieser Fehler überhaupt wegfällt, da ein auf einer Flüssigkeit schwimmender Körper eine und nur eine durch das archimedische Prinzip gegebene Lage einnimmt, die infolge der leichten Beweglichkeit der Flüssigkeitsmolekel früher oder später, aber genau erreicht wird. Diese Ueberlegung war auch die Hauptursache, von dem Schwimmerprinzip die einfachste Lösung des Problems

zu erwarten. Obschon mir das Vorhandensein der Oberflächenspannung und ihrer Störungen nicht fremd war, war aus der Literatur kein genügender Ueberblick zu gewinnen, der gestattet hätte, diese Störung für den gegebenen Fall quantitativ abzuschätzen.

Erst durch die Erfahrung zeigte sich die grosse Bedeutung dieser Erscheinung, die sich bald als Hauptfehler von fast unüberbrückbarer Hartnäckigkeit erwies. Ich habe ihm deshalb ein besonderes Kapitel angewiesen, um hier nur noch die geringfügigen statischen Störungen, die von der Konstruktion herrühren, zu behandeln.

Am Schluss des vorigen Kapitels habe ich Führungen erwähnt, die das System erhalten soll, um die Skala in der richtigen Distanz vom Objektiv zu fixieren. Diese Führungen bringen nun die Gefahr mit sich, dass sie durch leichte Adhäsion oder auch durch Hängenbleiben am geführten Körper infolge leichter Unebenheiten eine falsche Gleichgewichtslage bedingen können. Es handelt sich nun darum, die Führungen möglichst glatt zu gestalten. Der Krümmungsradius der führenden Gleitflächen darf nicht zu klein sein, dünne Zylinder wirken umso reibender und anhängender, je mehr sich ihre Form einer scharfen Kante nähert. Empirisch zeigte sich ein Durchmesser von 5 mm als genügend. Wenn auch an den Führungen dieser Forderung genügt wird, so kann ein Schiefstehen der ganzen Vorrichtung infolge exzentrischen Auflegens der Last einen bedeutenden seitlichen Druck auf die Führungen erzeugen, der natürlich die Reibung entsprechend vergrössert, so dass das System zwangsläufig wird, also nicht mehr statisch wägt. Mit Hülfe eines kardanischen Gelenkes, indem die Last (Wagschale) aufgehängt wird, erzielte ich noch nicht vollkommene Vermeidung dieser Störung. Bei einer Neukonstruktion ist daher noch folgendes zu beobachten.

Ursprünglich waren die Führungsgabeln festliegend, am Gestell angebracht und die abwärts führenden Aufhängungen für die Wagschale dienten als Führungszylinder. Jetzt muss die Gabel an den Trägern befestigt werden und durch feststehende Führungszylinder orientiert werden. Die Gabeln sind so zu legen, dass sie sich mit dem theoretischen Schwerpunkt auf gleicher Höhe befinden. Erfolgt nun eine kleine Neigung, so findet sie um diese Gabeln statt, ein seitlicher Druck kann dann nicht entstehen.

Im allgemeinen ist hier eine sehr präzise Konstruktion das beste Mittel zur Vermeidung dieser kleinen Fehler. —

In diesem Kapitel haben wir noch den Auftrieb mit seinen Unregelmässigkeiten zu betrachten, als das Grundprinzip, auf dem die Wage beruht.

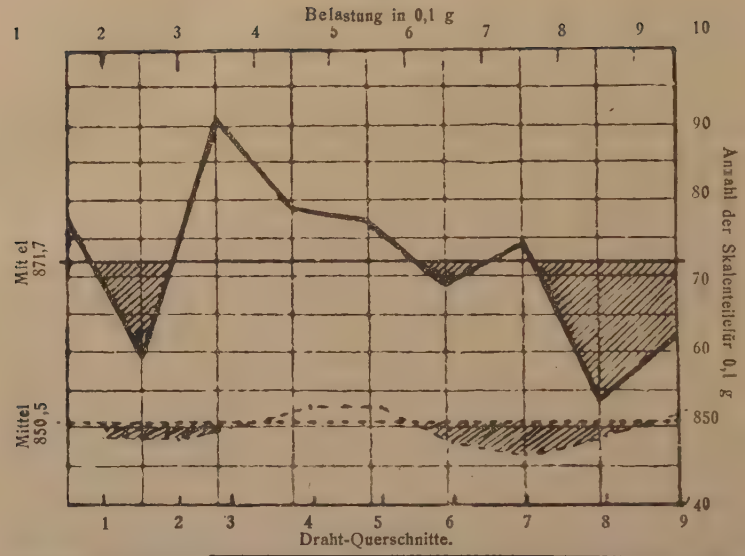
Damit strenge Proportionalität zwischen der relativen Eintauchtiefe und dem Uebergewicht besteht, ist vor allem die äusserste Konstanz des Querschnittes des Senkdrahtes erforderlich. Da mir ursprünglich kein Messinstrument zur Verfügung stand, das gestattet hätte, den Durchmesser des Drahtes zu kontrollieren, so wählte ich nach dem Augenschein einen solchen. Die Qualität war aber in dieser Richtung sehr schlecht, worüber mich allerdings erst hunderte von nutzlosen Messungen (Wägungen) belehren mussten. Erst durch die Störungen, die immer an analogen Lagen auftraten, liess sich eine gewisse Konstanz in den Unregelmässigkeiten ahnen. Systematische Prüfung führte dann zur Entdeckung der Ursache.

War auch der grosse Zeitverlust wenig angenehm, so gewährte die nachherige Uebereinstimmung der aus den Drahtmessungen abgeleiteten theoretischen Fehler mit den praktischen durch Wägung ermittelten eine gewisse Befriedigung. Es wurde dadurch der wichtige Ueberblick über die Grössenklasse der Fehler gewonnen als sicherer Wegleiter für die Weiterarbeit.

Im folgenden seien die Untersuchungen (siehe Kurve) näher beleuchtet. Es wurde hier mit einer ersten Skala gearbeitet, die auf 0,1 g zirka 800 Teile enthielt. In den Tabellen sind die abgelesenen Werte aufgezeichnet. Für die Kurven sind die Skalenfehler noch berücksichtigt. Die gezogene Kurve stellt die durch Wägung gefundenen Skalenwerte für je 0,1 g dar im Bereich von 0,1 — 1,0 g dar. Diese Skalenwerte sind die Mittel aus je 10 Einzelwägungen, so dass kleine Ablesefehler und Gleichgewichtsstörungen als eliminiert gelten können.

Die punktierte Kurve stellt die Skalenwerte dar, die durch Rechnung aus den Querschnitten des gleichen Senkdrahtes erhalten wurden.. Auf die Methode dieser betreffenden exakten Messungen soll später eingegangen werden.

Wie man aus den beiden Kurven ersieht, fallen die maximalen und minimalen Gebiete praktisch zusammen.



0,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
9035	8202	9350	6443	5585	4762	3838	2975	2075	1228
015	213	64	65	84	15	32	45	69	05
031	206	38	63	80	24	44	57	92	00
68	181	15	26	87	15	53	55	80	06
99	64	09	63	86	04	44	35	95	00
60	69	26	45	85	700	35	44	81	00
85	90	28	35	82	695	17	40	83	00
86	60	10	57	75	98	35	38	82	06
39	89	09	55	66	693	35	26	77	10
49	55	05	38	78	700	30	36	85	15
M 9055	8183	7325	6449	5581	4708	3836	2945	2080	1207
Diff. (korr)	862	853	874	868	877	878	891	859	876

Die quantitativen Unterschiede werden hinlänglich erklärt durch Kapillaritäts- und Temperaturstörungen. Dass in der graphischen Darstellung die Mittel beider Kurven nicht zusammen fallen, liegt daran, dass die aus den Querschnitten abgeleitete Kurve blos hauptsächlich die relativen Unterschiede berücksichtigt, da der absolute Durchmesser des Drahtes nur annähernd bekannt war.

Als Endergebnis stellte sich die Notwendigkeit heraus, einen neuen Senkdraht zu konstruieren. Wie sich durch Verrechnung obigen Zahlenmaterials ergibt, sind die Ansprüche auf Konstanz des Querschnittes gross. 0,001 mm Schwankungen des Durchmessers stellen die

Höchstgrenze dar. Da die Herstellung eines solchen Drahtes von einer feinmechanischen Werkstätte mangels geeigneter Messaparate und maschineller Hilfsmittel abgelehnt worden war, so machte ich mich daran, die vorhandenen Stahldrahtsorten des Handels auf ihre Genauigkeit zu prüfen.

Ich benutzte dazu wieder die schon erwähnte Messvorrichtung, die auch für den ersten Draht gebraucht worden ist. Sie möge hier kurz beschrieben werden.

Ein Sphärometer konnte, weil es zwischen Spitzen misst, nicht Anwendung finden. Darum suchte ich auf mikroskopischem Weg der Sache beizukommen. Die Möglichkeit, einen Messtisch zu benützen, fiel darum schon weg, weil bei der nötigen hohen Vergrösserung (zirka 800×) die Anvisierung der äussersten Mantellinien des 1,5 mm dicken Drahtes infolge von Beugungserscheinungen und Reflexen nicht möglich war, ausserdem konnte das Objektiv nicht in genügende Nähe gebracht werden, weil die Gegenstandsweite unter 0,75 mm = ½ D lag. Ich verfuhr folgendermassen:

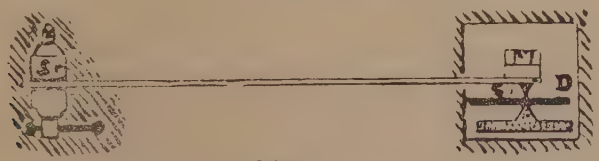


Fig. 3.

Ein Vierkantstahlstab von zirka 1 m Länge ist am einen Ende in den Schraubstock gespannt, sein anderes Ende, das auf dem Objekttisch eines Mikroskopes gleitet, trägt einerseits ein aufgekittetes Deckglas mit Marke (M), die man anvisiert, anderseits einen kurzen, gehärteten Stahldraht von 1 mm Durchmesser. Dieser Stahldraht (s) dient als modifizierte Schneide und wird durch die Federkraft des Stahlstabes gegen eine gleiche Schneide gedrückt, die in ein festes Widerlager eingelassen, starr mit dem Objekttisch verbunden ist. Der zu messende Draht (D) wird zwischen die beiden Schneiden eingeschoben. Da der federnde Stahlstab sich immer dem zu messenden Draht anschmiegt, so folgt er bei einer Längsverschiebung des letzteren allen Unregelmässigkeiten. Im Sehfeld des Mikroskopes bewegt sich die Marke entsprechend diesen Unregelmässigkeiten multipliziert mit der Vergrösserungszahl des Mikroskopes.

Mit Hülfe eines Messokulars mit Trommel, das provisorisch von einem Goniometer genommen in das Mikroskop eingebaut wurde, konnten diese Schwankungen auch gemessen werden und zwar mit der verlangten Genauigkeit. Die abgelesenen Resultate waren allerdings noch umzurechnen, insofern die Trommel ihre ursprünglichen Bestimmung gemäss nach 6 geteilt ist.

Eine bedeutende Fehlerquelle für die Messung bilden die beiden Schneiden, wenn sie einander nicht genau gegenüber stehen. Kleinere Schwenkungen des Drahtes bewirken infolge Hebelwirkung grosse Verschiebungen der Marke. Die beiden Schneiden werden daher so lange gegeneinander verschoben, bis bei Schwenkungen des Drahtes um zirka 5° keine Bewegung der Marke mehr erkennbar ist.

Da zu erwarten war, dass der Querschnitt kein Kreis sei, wurde jeder Querschnitt durch 6 mal 2 Durchmesser definiert (mit Hülfe einer auf den Draht aufgesteckten Teilscheibe) und aus diesen 12 Messungen der mittlere Querschnitt berechnet. —

Infolge des Krieges war eine grosse Auswahl an Stahlsorten, in absehbarer Zeit nicht erhältlich, insbesondere nicht die Qualität „Klavierdraht“ in der gewünschten Stärke. Infolge ihrer, der besonderen Bestimmung entsprechenden Feinheit stellte sie wohl das Idealste für den gegebenen Zweck dar. Als Ersatz wählte ich die Qualität „Stahldraht, federhart, Gebrauchssorte“. Ausserdem hatte ich noch die Sorte „Silberstahl“. Diese letztere erwies sich aber zu weich, um sie zwischen den stumpfen Schneiden zu messen, ausserdem zeigte die Oberfläche in mikroskopischer Abschätzung grosse Unregelmässigkeiten, die schon längst die erlaubte Fehlergrenze überschritten. Es blieb also nur noch die Sorte „federhart“. Da sie sich als sehr gleichmässig erwies, wurden auf die Länge von 10 cm blos 4 Querschnittsmessungen gemacht, die in folgender Tabelle niedergelegt sind. Die ganzen Zahlen sind ganze Mikrometerteile und gleich zirka 0,005 mm. Die Kontrollnummern stellen die Punkte der Teilscheibe dar, die zur Orientierung der 6 zu messenden Richtungen diente.

Die maximale Schwankung der mittleren Durchmesser ist $0{,}16 \times 0{,}005$ mm; sie übersteigt die geforderte Grenze nicht. Ich behielt also diese Stahlsorte bei.

Die Zahlentabelle zeigt die Erscheinung der Rotation des elliptischen Querschnittes des Drahtes in Bezug auf die Teilscheibe, d. h. der Draht ist tordiert, was von der Herstellung herrührt, indem derselbe, nachdem er das Zieheisen passiert hat, auf Trommeln aufgewickelt wird, wobei er sich schwach verdreht. Dieses Zusammentreffen der Messung mit der Erfahrungstatsache bestätigt zugleich die Genauigkeit der Messung. —

Wie schon erwähnt, wurde auch der fehlerhafte Draht nach dieser Art durchgemessen, doch bieten die Zahlenwerte der 16 Querschnitte wenig Interessantes, zumal ihr Sinn in der punktierten Linie voll zur Geltung kommt (s. Kurve).

Querschnittmessungen f. Stahldraht (federhart, Gebrauchssorte).

Durchmesser	Querschnitt I	II	III	IV
			- Max. 6,7	- Max. 6,7
1	6,7 - Max. 67	6,7 - Max. 6,7	6,5	6,5
2	5,6	5,2	5,3	5,3
3	3,7	3,8	2,5	2,5
4	1,8	1,8	1,8	1,7
	- Min. 1,4	- Min. 14	- Min. 1,6	- Min. 1,6
5	2,5	2 5	3,0	3,1
6	4,2	5,0	4,5	4,5
1a	6,2	6,6	6,5	6,6
2a	5,0	5,3	5,3	5,4
3a	3,6	3,6	2,6	3,2
4a	1,6	1,4	1,6	1,6
5a	2,7	2,5	4.5	2,5
6a	4,2	4,4	4,3	4,3
Mittlerer Durchmesser ca. 1,5 mm ⊢	4,78	4,88	4,72	4,72
	1,00 = 0,005 mm			

4. Einfluss der Oberflächenspannung.

Wie schon im vorhergen Abschnitt bemerkt worden, spielt die Kapillarität unter allen Fehlerquellen die Hauptrolle und zwar aus zwei Gründen. Erstens sind die Störungen, die sie hervorbringt, quantitativ schwer fassbar und zweitens ist ihre Anwesenheit als typische Eigenschaft einer Flüssigkeit absolut nicht zu vermeiden.

Schon gleich von Anfang an zeigte sich bei den Messungen ein ausserordentliches Schwanken der Resultate, dadurch gekennzeichnet, dass für immer gleiche Be-

lastung der Wage nach jeder Auslösung eine andere Einsinktiefe beobachtet wurde, trotzdem die bei der Messung von Kapillarkonstanten üblichen Vorsichtsmassregeln genau beobachtet wurden. Im Laufe der Untersuchungen stellte es sich heraus, dass die üblichen Methoden noch lange nicht genügen, um die typischen Erscheinungen der Adhäsion einer Flüssigkeit an einen festen Körper in der vollen Grösse hervortreten zu lassen. Im Laufe dieses Kapitels soll darauf näher eingetreten werden, weil hier eine Entdeckung gemacht wurde, die dieses Gebiet der praktischen Physik fundamental berührt. Doch seien vorher alle andern Mittel, die zur Lösung eingeschlagen wurden, erwähnt.

a) Die Reinigung von Wand und Flüssigkeit galt bis anhin als einzige Möglichkeit, der Kapillarität konstante Werte zu verleihen. Aus diesem Grunde wurde das Quecksilber äusserst sorgfältig von chemischen Verunreinigungen betreit, nach der bekannten Methode mit Durchtropfen durch eine Reinigungsflüssigkeit, Salpetersäure. Dies wurde soweit getrieben, dass sehr starke Salpetersäure (1 vol HNO_3 auf 5 vol H_2O) solange auf das Quecksilber einwirken konnte, bis der zwanzigste Teil desselben aufgelöst war. Eine qualitative Prüfung des gereinigten Metalls durch Verdampfen von zirka 3 g ergab einen kaum sichtbaren braunen Rückstand (Kohle), von organischen Verunreinigungen herrührend.

Der Draht wurde durch Aether und Benzol gereinigt. Ergebnis: Es zeigten sich bedeutende Unterschiede in den Ablesungen, insbesondere spielte die Art der Auslösung eine grosse Rolle, die Resultate zeigten sich nämlich immer in der Richtung verschoben, von wo die Auslösung ausging. War der Draht vor der Auslösung tiefer eingetaucht als die Gleichgewichtslage verlangte, so war das abgelesene Gewicht zu gross, und umgekehrt. Die Unterschiede betrugen oft 0,05 g, also das 500fache der erwarteten Empfindlichkeit!

Durch häufige Wiederholung ergab sich nun, dass diejenigen Werte, welche erhalten wurden durch Auslösung von oben viel weniger untereinander differierten, als die umgekehrt erhaltenen.

Mit anderen Worten: Durch längeres Verweilen innerhalb der Flüssigkeit findet eine Befreundung der Körperoberfläche mit der Flüssigkeitsoberfläche statt.

Diese kann soweit gehen, dass die typische Eigenschaft des Quecksilbers, nicht zu adhärieren, fast ganz verschwindet.

Die Erklärung wird durch die Annahme einer Diffusion von Quecksilber in die Körperoberfläche genügend geleistet.

Die praktische Folgerung ist also die, dass im Ruhezustand der Senkdraht aus der Flüssigkeit herausragen muss. Da diese Regel verhältnismässig spät gefunden wurde, so war das Modell in dieser Hinsicht gänzlich widersinnig gebaut. Komplizierte Hilfsapparate die dadurch nötig wurden, konnten diese Unvollkommenheit nicht ganz beheben, so dass infolge dieser Aeusserlichkeit ein Wägen am Modell für den Ungeübten nicht leicht möglich ist.

b) Die bedenklichen Adhäsionserscheinungen, die der Senkdraht zur Flüssigkeit zeigte, und die sich augenfällig dahin äusserten, dass alle zufälligen Verunreinigungen der Oberfläche, z. B. Staub, beim Eintauchen des Drahtes mit hinuntergezogen wurden, als ob die Oberfläche aus einer zähen Haut bestände, veranlassten mich die folgenden Versuche durchzuführen.

Ich überschichtete die Quecksilberoberfläche mit einer Flüssigkeit, die auffallend kleine Adhäsion an feste Körper zeigt. Es ist Aethylenbromid.

Die Ueberlegung war folgende: Wenn der Draht eintaucht, so reisst er eine dünne Haut von Aeth. mit sich, das dann infolge des Auftriebs sich allmählich hinaufzieht. An den endgültigen Trennungsflächen von Quecksilber gegen Hilfsflüssigkeit und Hilfsflüssigkeit gegen Draht treten dann die Kapillarkräfte auf, die bei zylindrischem Draht für jeden Querschnitt konstante Werte erwarten lassen, weil die Adhäsion Hilfsflüssigkeit-Draht und Hilfsflüssigkeit-Quecksilber eher konstante Werte liefern als Draht gegen Quecksilber.

Fig. 4 und 5.

Ich variierte die Idee noch so, dass für die eine Versuchsreihe die ganze Quecksilberoberfläche, für die andere nur ein kleiner Teil derselben beim Draht mit der Hilfsflüssigkeit überdeckt wurde.

Anfängliche, durch Stichproben gewonnene Resultate liessen sehr gute Resultate erwarten, allein eine allmählich durch Verdampfen oder Eindringen der Hilfs-

flüssigkeit in die Quecksilberoberfläche erfolgende Verunreinigung derselben verschlechterte die Resultate zusehends. Nachdem noch eine weitere Zahl von Flüssigkeiten, wie Azetylen-Tetrabromid, Aethylen-Chlorid, Aether, Petroleum, auf ihre bessere Eignung untersucht waren, wurde die Idee der schlechten Erfahrung halber endgültig verlassen und die nächsten Variationen studiert.

c. Einfluss der Art der Auslösung und besonders der Art der Erreichung der Ruhelage auf die Lage derselben: Da der schon unter a) bemerkte grosse Einfluss der Auslösungsmanier die Wichtigkeit dieser rein mechanischen Aeusserlichkeit bewies, hoffte ich hiermit die Konstanz zu erreichen, indem ich mir vorstellte, dass eine immer gleiche Art der Auslösung unter sich gleiche Resultate liefere.

Ich studierte folgende Variationen

a) Die Wage wird aus ihrer Arretierungsstellung langsam in die Gleichgewichtslage fallen, bezw. steigen gelassen, so dass ein Schwingen um diese Lage nicht eintreten kann.

Ergebnis: Die zusammengehörigen Werte zeigen eine auffallende Uebereinstimmung, so weit es die kleinen Unterschiede der manuell ausgeführten Auslösung zulassen.

b) Die Wage wird aus ihrer Arretierungsstellung sofort freigelassen, so dass sie durch langsam abnehmende Schwingungen von selbst die Gleichgewichtslage erreicht.

Ergebnis: Die erhaltenen Werte zeigen wie vorhin grosse Uebereinstimmung, die selbst noch etwas grösser ist, da der individuelle Einfluss ganz wegfiel, indem die Wage, gemäss des Energieverlustes bei den Schwingungen, die natürlich in allen Fällen gleich waren, nach immer gleichen Bedingungen zur Ruhe kam.

c) Durch die Verbesserung der Resultate als Folge der Schwingungen (Unterschied noch zirka 1,8 mg) geleitet, erwartete ich von künstlich hervorgebrachten Schwingungen entsprechende Erfolge, zudem in der Praxis der Barometerablesungen zum gleichen Zweck als Hausmittel ein gelindes Klopfen am Barometerrohr angewendet wird. Anfänglich versuchte ich es mit manuell erzeugten Erschütterungen, konstruierte aber bald darauf einen selbsttätigen Erschütterer. Ein Uhrwerk

wurde so umgebaut, dass es durch Gewichte getrieben werden konnte. Auf die Peripherie der verschieden schnell laufenden Zahnräder liess ich ein leichtes Metallstreifchen auflegen, das um eine Axe drehbar mit dem einen Ende in die Oberfläche des Quecksilbers tauchte.

Rotierten nun die Räder, so erteilten ihre Zähne dem Metallstreifen Erschütterungen, die er seinerseits an das Quecksilber weitergab. Es bilden sich feine regelmässige Oberflächenwellen, die die Adhäsion des Quecksilbers an den Draht beinahe aufheben.

Die Anzahl der Schwingungen liess sich variieren von etwa 5—200 pro Sek. Auch die Stärke der Schwingungen etwas variabel, doch erreichte ich nicht die gewünschte Amplitude von 2—3 mm.

Im besondern ergaben langsame, kräftige Schwingungen bessere Resultate, als schnelle und schwache.

Auf diese Weise erzielte ich eine weitere Verbesserung, so dass ich endlich die ganze Skalenlänge systematisch durchprüfen konnte, bei welcher Gelegenheit dann der schon erwähnte erhebliche Drahtfehler zum Vorschein kam.

Es sei hier noch eine Zusammenstellung einer Anzahl Messungen aufgeführt, die einen Ueberblick geben über die fortschreitende Verbesserung der Genauigkeit der einzelnen Wägung. Diese Genauigkeit wurde für drei Lagen (Belastungen) geprüft. Eine Einheit der angeführten Skalenwerte stellt rund 0,12 mg dar.

	OS	S	OSE	SE
Belastung 0,2 g	2400 2350 2335	2300 2330 2310	2355 2355 2345	2343 2330 2348
Maximal Schwankung	65	30	10	18
Belastung 0,5 g	4980 4990 4983	4992 4985 5005	4995 4987 4987	4970 4969 4975
Maximal Schwankung	10	20	8	6
Belastung 0,8 g	7659 7635 7662	7645 7649 7638	7635 7638 7632	7655 7632 7620
Maximal Schwankung	27	11	6	35

Das Gleichgewicht wird erreicht O S ohne Schwingung
S mit „
E mit Erschütterung (Wellenapparat)

Wie man aus der Tabelle ersieht, teilen sich die beiden letzten vertikalen Reihen in die besten Resultate. Warum nicht die letztere allein, erklärt sich aus den stärkern Schwankungen der Skala im Gesichtsfeld.

Auffallender ist aber, dass die Zonen (0,8 g) 7600 und besonders (0,5 g) 4900 absolut bessere Resultate liefern als die Zone 2400 (0,2 g).

Konnte man hier infolge der kleinen Anzahl von Messungen eine neue Erscheinung nur ahnen, so trat sie bei der jetzt folgenden grossen Messerie, welche unter 3. erwähnt ist, klar zu Tage.

Es mögen daher die ausschlaggebenden Messresultate nochmals angeführt werden.

Gewicht 10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
9035	8202	7550	6443	5585	4762	3838	2975	2075	1229
15	213	64	65	84	15	32	45	69	05
31	206	38	63	80	24	44	57	72	00
68	181	15	26	87	15	53	55	80	06
79	64	09	63	86	04	44	35	95	00
60	69	26	45	85	00	35	44	81	00
85	90	28	35	82	700	17	40	83	00
86	60	10	57	75	695	35	38	82	06
39	89	09	55	66	98	35	26	77	10
49	55	05	38	78	93	30	36	85	15

Woher kommen nun die Unterschiede der einzelnen Zonen?

Wenn schon die Konstanz der Kapillarität für Quecksilber bei abnehmendem Durchmesser auch abnimmt, so kann dies bei den vorliegenden ganzen Unregelmässigkeiten des Drahtdurchmessers nicht die Ursache sein. Die daraus resultierenden Schwankungen würden niemals die Grössenklasse erreichen, um die es sich hier handelt. Die Ursache liegt vielmehr an übrigens kaum sichtbaren Verschiedenheiten der einzelnen Partieen der Drahtoberfläche, dahin sich äussernd, dass die etwas rauheren Partieen die konstanteren, die sehr glatten Partieen die unkonstanteren Werte liefern.

Daraus ergab sich eine weitere Spezialuntersuchung, die wieder für die Physik wichtige Ergebnisse zeitigte.

d) Einfluss der Oberflächengestaltung des festen Körpers (Wand) auf die Kapillarität von Flüssigkeiten, insbesondere des Quecksilbers.

Zur Prüfung obiger Gesetzmässigkeit diente eine feinst matt geschliffene (Unebenheiten höchstens 0,001

mm) und eine polierte Glasplatte. Beide wurden möglichst gleich geneigt und dann auf jede ein Tropfen reinen Quecksilbers aufgelegt. Auf der matten Glasplatte rollte dieser Tropfen noch lebhaft fort, wenn er auf der gleichgeneigten glatten Platte schon längst keine Neigung mehr zeigte, der Schwerkraft zu folgen.

Diese Versuche wurden vielfach wiederholt. Auch bei stark beschmutztem Quecksilber stimmte das Ergebnis vollkommen mit dem obigen überein. Um eine Zahl anzugeben, können wir sagen, dass die matte Fläche den Quecksilbertropfen mindestens 10 mal, um nicht zu hoch zu greifen, empfindlicher erhält, als die glatte. Dies kommt lediglich daher, dass die Mattheit der Adhäsion entgegenwirkt.

Die Tropfengestalt entspricht also in diesem Fall viel eher der durch die Oberflächenspannung geforderten. — Ist umgekehrt die Flüssigkeit eine adhärierende, so findet wiederum die Adhäsion an der matten Fläche viel besser statt als an der glatten. Ich erinnere nur an die Schwierigkeit, bei Kapillarmessungen eine wässerige Flüssigkeit zur Benetzung zu bringen. Hier gelingt dies spielend leicht.

Um nun die typischen Eigenschaften der Flüssigkeit in Bezug auf Kapillarität hervortreten zu lassen, ist es noch nötig, die schon früher erwähnte Befreundung der Flüssigkeit mit der Gefässwand zu berücksichtigen.

Benetzende Flüssigkeiten sind möglichst lange, nicht benetzende möglichst wenig lange vor der Messung mit der Gefässwand in Berührung zu lassen.

Erstere Regel war schon lange bekannt und wird nur der Gegenüberstellung halber erwähnt.

Für genaue Kapillaritätsmessungen hat man sich an folgende Regeln zu halten:

Matte Oberfläche des Kapillarrohres für alle Fälle.

Lange Berührung der Kapillare mit der Flüssigkeit, wenn diese adhärierend,

Möglichst kurze Berührung der Kapillare mit der Flüssigkeit, wenn diese nicht adhärierend ist. Dadurch erhält der Randwinkel im ersten Falle genau und lange Zeit 0^{0}, im zweiten Fall genau und lange Zeit 180^{0} (nicht äusserst variabel wie bis anhin).

Die Kapillaritätsmessungen werden dadurch äusserst dankbar und dürften wichtige Zusammenhänge zwischen Konstitution und Oberflächenspannung zeitigen.

Ausser dieser fundamentalen Verbesserung der physikalischen Messmethode kommen noch hinzu Verbesserungen an physikalischen Instrumenten, nämlich am Barometer, am Gasthermometer, an der Wasserwage und an Aräometern.

Diese Instrumente sind so einzurichten, dass die Stellen der Glaswand, welche von der Quecksilberkuppe oder sonstigen Flüssigkeitskuppe berührt werden, mattiert werden sollen. Um trotzdem leicht ablesen können, lässt man zwei schmale Stellen in der Glaswand glatt und durchsichtig.

Nach dieser Abschweifung kehren wir wieder zurück zur Ausnützung der erwähnten Erscheinung für die Konstruktion der Wage. Es wird sich also darum handeln, die Oberfläche des Drahtes matt zu machen. Dazu dient folgendes Verfahren.

Der mit Polierrot hochpolierte Draht wird mit Wasser und etwas feinem Schmirgel mit Hülfe eines Lappens der Länge nach abgerieben, so dass er überall von Wasser benetzt ist, worauf man ihn unter Wasser aufbewahrt. Man taucht ihn dann in eine stark salpetersaure Merkurinitratlösung (z. B. das Nebenprodukt von der Quecksilberreinigung). Sofort zeigt sich ein lebhaftes Auflösen des Drahtes, das aber bald zur Ruhe kommt, indem sich eine schön graue Haut von feinstem Quecksilbertröpfchen niederschlägt.

Hierauf folgt ein rasches Abspülen in Wasser und Abreiben des Quecksilberbelages, dann Trocknen in der Flamme. Dieses Trocknen soll nicht bis zum Anlaufen des Stahls getrieben werden, denn es zeigte sich, dass ein so oxydiertes Stahlstück ähnliche Adhäsion an reines Quecksilber zeigt, wie leicht oxydiertes Quecksilber an feste Körper.

Ein richtig präparierter Draht hat eine fein matte, dunkelgraue Oberfläche, nur zeigen sich leichte Aetzfiguren, die von der durch das Ziehen veränderten Struktur des Drahtes herrühren, und die besonders in der Längsrichtung verlaufen.

Der Bedingung für ganz gleichmässiges matt, wie es die Theorie verlangt, ist also nicht vollständig genügt, was sich bei den später folgenden Kontrollwägungen durch ganz kleine Störungen äussert.

e) Wirkungen, die auf der Gestalt und Reinheit der Flüssigkeitsoberfläche beruhen.

Selbsverständlich kann die Kapillarität einen konstanten Wert nur dann zeigen, wenn wirklich nur die Oberfläche der Flüssigkeit zur Geltung kommt. Ist diese verdeckt, z. B. durch eine leichte, wenn auch kaum sichtbare Haut, wie sie sich beim Quecksilber oft bildet, so ist natürlich die gemessene Kapillarität die Resultante aus der Adhäsion von Haut an Wand und Haut an Quecksilber, oder gar von Haut an Wand, Quecksilber an Wand und Haut an Quecksilber.

Alle Versuche liefen nun bis dahin darauf hinaus, die Oberfläche der Flüssigkeit recht konstant sauber zu halten. Dies liefert natürlich eine wesentliche Verbesserung der Resultate, trifft aber den Kern der Sache nicht, indem auch, wie dargetan, die Gestaltung der Wand eine Rolle spielt. Eine glatte Wand zeigt im allgemeinen die Tendenz, die Kapillarkonstante einer adhärierenden Flüssigkeit arithmetisch zu verkleinern, die einer nicht adhärierenden (geschm. Metalle) arithmetisch zu vergrössern.

Dies zeigt sich unter andern hübsch daran, dass oxydierbare Körper, z. B. Eisen unter Wasser bei glänzender, also sehr glatter Oberfläche viel weniger und unregelmässiger angegriffen werden (rosten), als matt gehaltene.

Das Rosten selbst mattiert die Oberfläche, so dass sie rasch der Zerstörung anheimfällt; der Rost „frisst" nach dem Volksmund.

Obschon bei den Messungen für Quecksilber mit allem Raffinement gearbeitet wurde, erhielt man nie die gewünschten konstanten Werte.

Trotzdem war es nur natürlich, bei meiner Arbeit auch die Oberflächenreinheit gebührend zu berücksichtigen. Durch die schon besprochene chemische Reinigung zeigte das Hg keine merkliche Tendenz, eine Haut zu bilden. Die eventuellen Verunreinigungen rührten von äussern Einflüssen, von Fett und Staub her. Da ein jedesmaliges Filtrieren vor der Messung natürlich nicht anging, so wurde die Reinigung nach folgender Methode erzielt.

Tauchen wir einen Körper, z. B. einen Stab, in Quecksilber, so werden nach Beobachtung alle Staubteilchen, überhaupt Verunreinigungen, mit hinuntergezogen und legen sich an die Wand des Körpers an. Zieht man ihn nun wieder heraus, so kommen alle diese Körperchen wieder zum Vorschein und legen sich wieder auf

denselben Ort wie vorher. Geben wir nun aber dem Körper eine klebrige Oberfläche, indem wir ihn mit einer Substanz bestreichen, die neben ihrer Klebrigkeit eine die Adhäsion zum Quecksilber überwindende Kohäsion zeigt, so werden beim Eintauchen die mitgezogenen Körperchen durch den Wanddruck angeklebt. Beim Herausziehen sind sie dann aus dem Quecksilber verschwunden.

Durch Empirie zeigte sich eine zähe invertierte Zuckerlösung, die zur Feuchterhaltung kleine Mengen Chlorkalzium enthält als die brauchbarste Substanz.

Schon dreimaliges Eintauchen eines 8 cm langen, 5 mm dicken Stabes liess auf dem Quecksilber auch nicht die Spur sichtbarer Verunreinigung zurück.

Ursprünglich wurde wieder manuell verfahren, indem vor jeder Messerie eine Reinigung der Hg-Oberfläche stattfand. Später übernahm eine mechanische Vorrichtung die Arbeit, so dass vor jeder einzelnen Wägung eine Reinigung stattfand.

Als weitere Störung auf diesem Gebiet zeigte sich die Krümmung der Oberfläche, der Meniskus. Schwimmt nämlich die Wage durch ihre freie Beweglichkeit im Gebiete, wo die Oberfläche merklich tiefer liegt, als an andern, so zeigt sie selbstverständlich falsche Werte. Ausserdem entsteht gegen den Rand des Meniskus hin ein merklicher Zug, der seinerseits eine Reibung in den Führungen bedingen kann.

Man hat also darauf zu achten, dass die Oberfläche möglichst gross gewählt wird, so dass der Bewegungsraum, den die Führungen dem Draht gestatten, als horizontal eben gelten kann. Das Quecksilbergefäss ist zweckmässiger Weise mattiert.

Die Messungen, welche die Richtigkeit der in diesem vierten Kapitel erhaltenen Regeln bestätigen, folgen am Schluss.

Derjenige Fehler, der die grössten Werte erreicht, aber relativ einfach eliminiert werden kann, ist verursacht durch

5. Temperatureinflüsse.

Sie machen sich in zweierlei Richtung geltend, als
a) Wärmeströmung und
b) Ausdehnung von Schwimmer und Flüssigkeit.

a) Wärmeströmung.

Sie entsteht dann, wenn Temperaturdifferenzen in der Flüssigkeit auftreten. Trifft die Strömung auf den Schwimmer, so wird dieser in der betreffenden Richtung fortbewegt.

Zur Vermeidung dieser Konvektion hat man durch Wärmeisolation des Quecksilbergefässes rasche Temperaturschwankungen zu vermeiden, ausserdem bietet die Verwendung von Quecksilber grosse Vorteile, weil es mit seiner grossen Wärmeleitfähigkeit alle andern Flüssigkeiten übertrifft.

b) Ausdehnung v. Flüssigkeit und Schwimmer.

Der Schwimmer bestehe aus einem festen Körper, z. B. einem Metall. Sein Ausdehnungskoeffizient ist kleiner als der der Flüssigkeit.

t_1 ist die Temperatur, bei welcher die Wage auf Null einspielt. Sie wächst auf t_2, bei der die thermische Abweichung bestimmt wird.

v_1 und v_2 sind die entsprechenden Volumina des Schwimmers.

s_1 und s_2 die zugehörigen Dichten der Flüssigkeit

a linearer A.—K. des festen

b kubischer A.—K. des flüssigen Körpers

Auftrieb des Schwimmers $= v\,s$ bei der Temperatur t

$$v_2 = v_1 (1 + 3\alpha [t_2 - t_1])$$
$$s_2 = s_1 (1 - \beta [t_2 - t_1])$$

Die Abnahme des Auftriebes von t_1 bis t_2 oder die scheinbare Zunahme des Gewichtes ist

$$v_1 s_1 - v_2 s_2 = v_1 s_1 - v_1 s_1 (1 + 3\alpha [t_2 - t_1])(1 - \beta [t_2 - t_1]).$$

Es ergibt sich also für den Nullpunkt der Skala eine Verschiebung um plus die oben berechnete Anzahl Gramm.

Die einfachste Art der Korrektion wäre die, dass man vor jeder Wägung den Nullpunkt abliest, wie es bei der gewöhnlichen Wage der Fall ist; doch zeigt sich, dass für den praktischen Fall die Differenz der Nullpunkte mehr als ein Fünftel der Skala ausmacht, so dass eine andere Korrektion wünschenswert erscheint.

Eine solche ist gefunden, wenn man dem Schwimmer die gleiche W.-Ausdehnung geben kann, wie sie die Flüssigkeit hat. Es wäre aber reine Zufallssache einen festen Körper zu finden, der diese Forderung erfüllt

und dann wäre gegenseitige Unbeeinflussbarkeit erst noch die notwendige Bedingung.

Sicherer ist es, einen Schwimmer aus zwei Substanzen zusammenzusetzen, wobei die eine sich stärker, die andere sich schwächer ausdehnt, als die Flüssigkeit.

Es sei

Af der V.—A.—K. der Flüssigkeit, dann ist

A_1 „ „ „ des einen festen Körpers $> Af$

und A_2 „ „ „ des andern festen Körpers $< Af$.

a_1 und a_2 seien die relativen Volumina der den Schwimmer zusammensetzenden Komponenten A_1 und A_2.

Ist der V.—A.—K. des kombinierten Körpers gleich dem V.—A.—K. der Flüssigkeit, so gilt die Gleichung

$$a_1 A_1 + a_2 A_2 = (a_1 + a_2) Af,$$

$$a_1 A_1 + a_2 A_2 = a_1 Af + a_2 Af,$$

$$a_1 (A_1 - Af) = a_2 (Af - A_2)$$

endlich $a_1 : a_2 = (Af - A_2) : (A_1 - Af)$ d. h.

Die Volumina der Komponenten stehen zueinander im Verhältnis $a_1 : a_2$ gleich obigem Wert.

Als Körper, der sich schwächer ausdehnt, als Hg wählte ich Aluminium mit dem V.—A.—K. 0,0000714

Als Körper, der sich stärker ausdehnt, Hartgummi mit dem V.—A.—K. 0,000308 ca.

Nach der abgeleiteten Formel verhalten sich die Volumina von Hartgummi zu Aluminium wie rund 2 : 1.

Um einen Begriff zu geben, von den absoluten Dimensionen des Schwimmers und von der Grösse der auftretenden Fehler sei hier eine kurze Berechnung angeschlossen.

Das Volumen des Schwimmers ist abhängig vom Gewicht der Wage ohne ihn, und von seinem eigenen.

Es sei

V = Volumen des Schwimmers, das sich zusammensetzt aus den Volumina V_k und nV_k der Komponenten, wobei n das Verhältnis darstellt, das nach obiger Formel erhalten wird.

s_1 = Dichte des einen Körpers mit dem Vol V_k

s_2 = „ „ andern „ „ „ Vol nV_k

s = „ der Flüssigkeit

G = Gewicht der Wage ohne Schwimmer.

Dann ist

$$V.s = G + V \cdot \frac{s_1 + ns_2}{n}$$

Auftrieb Gewicht der Wage Volumen des Schwimmers Dichte des Gesamtschwimmer

und

$$V = \frac{G}{s - \frac{s_1 + ns_2}{n}}$$

Ist nun z. B. der ganze Schwimmer aus Aluminium, also unkonpensiert, so hat er das Volumen zirka 15 cm_3, da G gleich ungefähr 160 g ist.

Die für 10° Temperaturdifferenz erscheinende Schwankung berechnet sich auf — 0,22 g.

Dieser sehr grosse Fehler zeigte sich nun beim Hartgummi-Aluminiumkörper auf rund + 0,04 g reduziert. Wenn auch auf die Grösse des vorliegenden Zahlenwertes nicht allzuviel Gewicht gelegt werden darf, weil er das Ergebnis einer Untersuchung ist, die sich zeitlich sehr lange ausdehnte und der dann alle Fehlerquellen, welche davon herrühren, noch enthält, so sehen wir doch, dass die Kompensation dahin gelungen ist, dass der Fehler nun sogar in entgegengesetzter Richtung liegt und dort nur noch zirka ein Fünftel des ursprünglichen beträgt.

Dass die Kompensation nicht genauer eintrat, liegt an der Unsicherheit der Bezeichnung der Hartgummisorte in den Tabellen der phys. Daten.

Ich versuchte durch Wegdrehen von Hartgummi dem idealen Fall näher zu kommen, doch geschah das zu kräftig, so dass der resultierende Körper nun wieder eine Verschiebung um — 0,04 zeigte. Der ideale Punkt der Verschiebung 0 liegt also gerade in der Mitte zwischen dem jetzigen und dem vorigen Fall. Da aber unter keinen Umständen vollständiges Stillestehen bei wechselnder Temperatur erwartet werden kann infolge der kleinen Unterschiede in der Zunahme des V. — A. K. der Flüssigkeit und des festen Körpers bei steigender Temperatur, so verliess ich die Verbesserung des Verhältnisses durch Aenderung des Volumenverhältnisses des Schwimmerkomponenten und werde durch folgende konstruktive Lösung das Ziel erreichen.

Um den noch bleibenden kleinen Rest von Verschiebung zu eliminieren, wird das Objektiv des Ablesemikroskopes auf einen Metallthermometerstreifen gelagert und übernimmt dessen Verschiebungen infolge der Temperaturschwankungen. Durch geeignete Orientierung des Objektivs in Bezug auf den Metallstreifen lassen sich der Sinn und die Grösse der Korrektur leicht erreichen.

Der gleiche Einfluss der Temperatur, der den Auftrieb des Schwimmers ändert, äussert sich auch am Schwimmerdraht. Dort macht er sich geltend in Form einer Skalenwertverschiebung und zwar so, dass gleiche Gewichtsdifferenzen bei höherer Temperatur grössere Länge beanspruchen als bei niederer.

Will man sich die Korrektur durch Berechnung mit Hülfe des Thermometers ersparen, so hat man auch hier ein Kompensationselement so anzubringen, dass das Verhältnis der beiden Komponenten in jedem Querschnitt des Drahtes gleich gross ist und der obigen Formel entspricht. Praktisch liesse sich das so gestalten, dass der Stahldraht eine Rinne erhält, in die der Kompensator eingelassen wird. Die Abweichung, die zu korrigieren ist, ist klein. Sie beträgt für Stahl auf 10^0 und 1 g Länge zirka 0,0015 g.

Da aber die hier angenommene Temperaturdifferenz von 10^0 in Wägezimmern nie eintritt, so wird sich dieser Fehler noch entsprechend reduzieren.

6. Magnetische und elektrische Störungen.

Obschon ich von Anfang an den Einfluss des Magnetismus fürchtete, konnte ich damals die Anwendung von Stahl und Eisen bei der Konstruktion nicht vermeiden. Das ganze Rahmenwerk nahm nun im Laufe der Zeit merkliche magnetische Eigenschaften an, so dass die ursprünglichen Resultate alle mehr oder weniger davon beeinflusst sind. Da aber der Fehler ein konstanter oder mindestens stetiger war, so sind die abgeleiteten Regeln qualitativ doch richtig.

Der Einfluss ist übrigens sehr klein. Nur für die sehr feinen Messungen über die Empfindlichkeit, die noch am Schluss gemacht wurden, erwies sich eine unmagnetische Neukonstruktion als zweckmässig, so dass ich dann noch eine primitive Wiederholung herstellte.

Im übrigen gilt für die Praxis einfach die Forderung nach unmagnetischem Material, die nach meinen Erfahrungen ruhig gestellt werden kann. Der Schwimmerdraht selbst kann aus chemischen und Festigkeitsgründen nur aus Stahl bestehen, doch bietet der schwachmagnetische Manganstahl genügend Sicherheit.

Elektrische Störungen treten dann auf, wenn Potentialdifferenzen an der Wage oder in ihrer Umgebung auftreten, insbesondere verändert ein elektrisches

Potential die Oberflächenspannung. Durch die Reibung des Hartgummis am Quecksilber schien mir anfangs ein Auftreten von Elektrizität möglich, durch Prüfung mit dem Goldblattelektroskop wurde aber die Annahme entkräftet. Der Sicherheit halber kann man aber durch geeignete Erdung, z. B. mit Jonisierung der Luft allen Möglichkeiten vorbeugen.

Die Verdichtung von Gasen auf der Oberfläche fester Körper, welche bei Wägungen eventuell kleine Fehler erzeugen kann, wird hier durch ihre grosse Konstanz infolge von Bauart und Prinzip d. W. unmerklich in der Wirkung. Die Oberfläche des wägenden Teils ist klein und die Gewichte befinden sich unter immer gleichen Bedingungen im Gehäuse.

Noch sind zwei Fehler zu diskutieren, die durch die Konstruktion nicht dankbar wegzuschaffen sind, die aber durch ihre Kleinheit keine praktischen Störungen verursachen, wenn man bei ihnen die Vorsichtsmassregeln beobachtet, die auch bei anderen Wagen angewendet werden.

7. Luftwirkungen.

Genau betrachtet ist der Schwimmer getragen von zwei Medien, nämlich von der Flüssigkeit und der Luft. Tritt in einem von beiden eine Dichtveränderung ein, so ändert der Schwimmer seine Höhenlage. Dichte Veränderungen der Luft geben sich am Barometer kund. Die maximalen hier in Betracht kommenden Dichteveränderungen ergeben sich aus der maximalen Barometerschwankung für einen Ort und aus den Schwankungen durch Höhendifferenzen von zirka 1000 Metern.

Luftdruckschwankung	für 1000 m H.-Diff. ca.	100 mm
Maximale „	für einen Ort ca.	40 mm
	Gesamtschwankung ca.	140 mm

Für diese Gesamtschwankung berechnet sich bei ca. 10 cm Volumen der Wage eine Gewichtsdifferenz von 2,4 mg.

Die Schwankung durch Höhendifferenz ist $^5/_7$ des ganzen Fehlers und wird einmalig für jeden Standort der Wage durch Zulegen oder Wegnehmen eines kleinen Gewichtes korrigiert.

Der Rest von $^2/_7$ kommt bei üblichen analytischen Arbeiten kaum in Betracht,, weil in der kurzen Zeit der Analysendauer sich der Luftdruck nicht um störende Beträge ändert.

Die Differenz von den verschiedenen Materialdichten herrührend, ist für analytische Zwecke auch zu vernachnachlässigen, indem nur Gewichtsdifferenzen gemessen und meistens auch dieselben Gefässe verwendet werden.

Für genaueste physikalische Messungen ist die Kontrolle des Nullpunktes, wie sonst üblich, auch hier angebracht.

Eine Luftströmung tritt besonders dann auf, wenn ein Körper gewogen wird, der wärmer ist als die umgebende Luft. Bei der gewöhnlichen Wage wirkt diese Strömung so, dass der von der einen Wagschale aufsteigende Luftstrom eine erleichternde Wirkung auf diese ausübt. An der Decke des Wagengehäuses bricht er sich. Ein Teil des nun absteigenden Luftstromes trifft die andere Wagschale und drückt sie hinunter, verstärkt also damit die erste Wirkung.

Bei der neuen Wage fällt dies beinahe weg, weil nur eine Wagschale vorhanden ist.

8. Einfluss der Gravitation.

Infolge des eigentümlichen Prinzips der Wägung wird das Gewicht des Körpers in zwei Teile geteilt, wobei jeder Teil sein eigenes Messverfahren hat. Beide Teile stehen natürlich unter dem Einfluss der Gravitation und deren Aenderungen. Der grössere Teil wird durch Gewichte gemessen, die aber auch unter dem Einfluss der Schwerkraft ihr Gewicht ändern, wie der zu wägende Körper. Ganz anders mit dem Restgewicht.

Bezeichnen wir, wie unter „Prinzip der Wage“ das Gesamtgewicht mit $K+k$ oder besser mit $KM+kM$, wobei M die Gewichtseinheit vorstellt, so ist, wenn n den Koeff aus den beiden Gravitationen darstellt, nun das Gewicht des Körpers.

$KKnM + knM$; die Vorzahlen, die nun in der gebräuchlichen Gewichtsbestimmung das Gewicht angeben, sind also bei jeder Gravit gleich, wenn $KnM + knM$ mit Gewichtstücken gemessen wird, die früher GM jetzt GnM schwer sind.

Für den grössten Teil KM des Gewichtes des zu wägenden Körpers tritt dieser Fall ein, denn dieser Teil wird mit den Subtraktionsgewichten gemessen.

Das Restgewicht kM jedoch wird absolut gemessen mit Hülfe des einsinkenden Drahtes. Ein durch die grössere Schwere vergrössertes kM, also z. B. nkM zeigt sich an der Skala entsprechend an.

Die Gleichung lautet jetzt für das Gewicht des Körpers = KM + nkM oder K + nI.

Das Gewicht, das auf dieser Wage bestimmt ist, ist also bei wechselnder Gravitation ungleich.

Um das richtige Gewicht des Körpers zu erhalten, müssen wir das auf der Skala abgelesene Restgewicht mit n multiplizieren, bezw. durch n dividieren.

Betrachten wir den grössten Wert von n, so sehen wir, dass es eine Zahl nahe an 1 ist, d. h. die sich ergebenden Korrekturen sind gering.

Für die Aenderung der Gravitation mit der Lage des Ortes haben wir folgende Formel

$$\frac{G\varphi H}{g\,45} = (1 - 0{,}00259 \cdot \cos 2\varphi - 0{,}000\,000\,196\ H)$$

woraus $G\varphi H = 9{,}8062\,(1 - 0{,}00259 \cdot \cos 2\varphi - 0{,}000\,000\,196\ H)$

$G\varphi H$ = Gravitation in der Breite φ und der Höhe über Meer H i m.

G 45 = Normale Schwere bei 45° Breite u. Meereshöhe.

Nehmen wir wie bei der Luftdruckschwankung H maximal = 1000 m, so ist

G	bei 90° und 0 m Höhe	9,831
G	45° 0	9,806
G	0° 1000 m	9,779

Der maximale Unterschied zwischen den Normalgewichten unter 45° Breite bei Meereshöhe und den Gewichten

am Aequator in 1000 m Höhe . . . . . 0,27 %

an den Polen in Meereshöhe . . . . . + 0,25 %

am gegenwärtigen Modell beträgt das

+ 0,25 % von 1,0 g = + 0,25 mg

— 0,27 % von 1,0 g = — 0,27 mg

Es wird also eine Berücksichtigung dieser Abweichung zu erfolgen haben.

Die Gewichtszunahme, die das ganze System erfährt, ist 180 g × 0,25 % = + 0,45 g.

Die Gewichtsabnahme ist 180 g × 0,27 % = — 0,48 g

Diese Differenzen sind natürlich leicht zu kompensieren mit Hülfe eines Zulagegewichts, bis die Marke wieder auf 0 steht.

Auf ganz andere Schwierigkeiten stösst man bei der für das Restgewicht erscheinenden Skalenwertverschiebung, wenn man von einer rechnerischen Kompensation absieht.

Das n, für jeden Standort der Wage konstant, beträgt im Maximum n = 1,0027; im Minimum n = 0,9978.

Die einfachste Art der Kompensierung bestände darin, dass man für jeden Ort der Erde die Skala besonders aicht. Es würde auch schon genügen, die Skalen für Zonen von zirka fünf Grad Breitendifferenz zu justieren.

Dieser Lösung steht eine andere gegenüber, die theoretisch vollkommen ist. Sie besteht darin, dass man den Massstab so einrichtet, dass alle vorkommenden Skalenwerte auf ihm zu finden sind. Dies geschieht in einfacher Weise dadurch, dass man die Teilstriche nicht parallel, sondern nach einem Fluchtpunkt führt, der auf gleicher Höhe liegt wie der Nullpunkt der Skala. Diese ist horizontal verschiebbar, so dass man ins Gesichtsfeld engere oder weitere Skalenteile bringen kann.

In der Praxis nimmt man aber sowieso Umgang von einer genauen Aichung nach Gewichten, man wird so verfahren, dass die nach Längen geteilte Skala einer Gewichtsskala sehr nahe kommt, sodass die am kleinen Masstab abgelesenen Teile dir. als mg und $^1/_{10}$ mg ohne Fehler gelten können. Für die 0,1 und 0,01 g dient dann eine übersichtliche Vergleichstabelle, auf der einerseits die vom Nullstrich gemessene Zahl von ganzen grossen Skalenteilen nebst ihren zugehörigen Gewichten angegeben sind. An Hand eines kleinen Ausschnittes einer solchen Tabelle darstellend 0,3 g zirka und an drei Beispielen sei dies näher erläutert:

Teile der gr. Skala	Geh. der kl. Skala	g 0,
10	00	0081
1		179
2		287
3		37[illegible]
4		474
5		572
6		670
7		709
8		867
9		952
20	00	1063
1		1162
2		1261
3		1359
4		1457
5		1535
6		1653
7		1752
8		1850
9		1948
30	00	2046
1		2144
2		2245
3		2541

		Gr.	Kl	
Wägung 1.	Abgelesen	16	74	
	Tafel hat für 16 den Wert		0,0670	
	zu addieren		74	
	Gewicht		0,0744	g
Wägung 2.	Abgelesen 2305	=	1359	
			+ 5	
			0,1364	g
Wägung 3.	Abgelesen 3210	=	2243	
			+ 10	
			0,2253	g

Die hier besprochene Beeinflussung der Wägungen durch die Schwereänderungen zeigen die Brauchbarkeit der Einrichtung zur Messung der relativen Gravitation. Da aber eine genauere Prüfung der Frage eine Arbeit für sich vorstellt, die ich mir für später vorbehalten möchte, so sei hier nur die Richtung der Untersuchungen kurz ertwickelt.

Alle bisherigen Messungen von Bedeutung fussen auf der Verwendung des Pendels und beanspruchen viel Zeit und einen grossen Aufwand von Mitteln aller Art, besonders wenn viele Messungen auf weitem Gelände durchgeführt werden sollen. Ich verweise blos auf die in ihrer Art von Ausdauer und Präzision klassisch durchgeführten Messungen des Herrn Dr. Th. Niethammer, die in dem zum Teil recht unwirtlichen Gelände unserer Alpen stattfanden. Die auffallend wichtigen geophysikalischen Ergebnisse berechtigen zu einem Ausbau der Methode.

Ich gedenke nun die Wage für diesen Zweck so zu bauen, dass möglichst wenig Fehlerquellen übrig bleiben, was umso leichter zu erreichen ist, als sich der Mechanismus des Gravimeters bedeutend einfacher stellt, als der einer allgemein brauchbaren Wage.

Luftdruck und Feuchtigkeit werden unwirksam gemacht durch vollständiges Abschliessen der Wage von der Aussenwelt, eventuell durch Evakuieren. Temperaturschwankungen würden ausser durch den kompensierten Schwimmer noch durch einen empfindlichen Thermostaten entfernt.

Endlich die Empfindlichkeit durch hohe Belastung und sehr feinen Senkdraht bewirkt, welch letzterer um so feiner gewählt werden kann, als bedeutende Verschiebungen überhaupt nicht vorkommen und er deshalb sehr kurz sein kann (siehe aber im „Anhang“ eine Einschränkung dieses Satzes.)

V. Weitere Messresultate.

Da das eingangs beschriebene Modell an magnetischen Störungen litt, konstruierte ich noch eine einfache urmagnetische Ersatzvorrichtung provisorischer Art.

Ein leichter Aluminiumbalken wird vom Schwimmer getragen. Diesen Schwimmer habe ich nicht kompensiert, weil er nur 1 cm gross ist und weil die Messungen rasch und in einem Raume von recht konstanter Temperatur erfolgten. Vom Aluminiumbalken führen starre Messingdrähte abwärts und tragen unten die in einer Spitze aufgehängte kleine Wagschale.

Zuerst wurde die Frage geprüft, wie weit eine Gewichtsvermehrung ohne Arretieren und Neuauslösen von der Wage angezeigt wird.

Das Maximum der Gewichtszunahme war auf 0,01 g festgelegt.

Nachstehend einige Messresultate. Zur Selbstkontrolle war die aufgelegte Zahl von Milligrammen meistens vor der Ablesung nicht bekannt. In jedem Falle stimmte die Zahl der abgelesenen Milligramme auf Zehntel mit dem Wert der aufgelegten überein.

Eine Teilstrecke im kleinen Masstab ist praktisch gleich einem Milligramm (Zehnerstelle in der Tabelle).

Aufgelegtes Gewicht	Stand der Wage
	10 350
+ 1 mg	10 360
+ 5 mg	10 410
	8115
— 7 mg	8045
	10 330
+ 8 mg	10 410

Nachstehend noch ein Resultat mit einem vollständig glatten Draht erhalten.

	·· 70
+ 10 mg	·· 82

also blos der 10te Teil der theoretischen Verschiebung.

Befriedigt durch die hohe Empfindlichkeit bei mattem Draht und bei kleinen Gewichtsdifferenzen dehnte ich die analogen Versuche aus auf 1 Zehntelgramm.

Hier machten sich nun bereits optische Störungen geltend, die hauptsächlich von der Schiefstellung der Skala herrühren. Merkte ich mir aber die bestimmte Lage, die die Skala zum Mikroskop einnahm, und kam diese Lage bei einer andern Messung wieder vor, so stimmten die betreffenden Resultate sehr auffallend mit einander überein, wie die Tabelle zeigt.

Messungen mit gleichen Indizes entsprechen unter sich gleichen oder nahezu gleichen Skalenlagen.

I 9065	I 9075	I 9075	I 9075	II 9090	III 9080	II 9090	III 9082	Stand 1
a 8035	a 8040	a 8040	a 8035	b 8058	b 8055	b 8055	b 8055	Stand 2
1030 aI	1035 aI	1035 aI	1040 aI	1032 IIb	1025 IIIb	1035 IIb	1027 IIIb	Skalenl. f. 0,1 g

Ist der Unterschied in den Skalenlängen für 0,1 g an sich nicht bedeutend, so ist er namentlich klein, wenn die vergleichbaren Werte nebeneinander gehalten werden. Er beträgt dann nicht mehr als 0,5 mg.

Trifft diese Genauigkeit für die ganze Skalenlänge zu, so ist die Wage schon für viele Arbeiten zu gebrauchen, besonders infolge der bei der Beschreibung der Wage erläuterten Schnelligkeit der Gewichtsermittlung. —

Es wurden nochmals eine Reihe von Messungen in Form von Stichproben ausgeführt, die den Drahtquerschnitt kontrollieren sollten.

Die Genauigkeit bei der Ablesung konnte nicht unter 1 mg gehen.

Vier Messungen der Skalenlänge für je 0,1 g betrugen

	1031	1024	1031	1029
Differenz	0.7	0,7	1,2	mg

Wie man sieht, überschreiten die Abweichungen nur wenig den Wert, der für die Ablesegenauigkeit in Anspruch genommen wurde.

VI. Anhang.

Da durch die letzten Messungen die erwartete grosse Empfindlichkeit der Wage für kleine Intervalle erwiesen war (zirka 0,1 mg für 0,01 g), so war damit die Möglichkeit gegeben, sie für Differenzwägungen, die in diesen Grenzen liegen, anzuwenden.

Solche kleine Gewichtsdifferenzen treten z. B. auf bei Dichtigkeitsänderungen infolge Temperaturdifferenzen, gemessen an Auftriebsänderungen; mit anderen Worten, bei der Bestimmung von Ausdehnungskoeffizierten nach der Auftriebsmethode.

Zwei solcher Messungen wurden durchgeführt, je eine für Zinn und Wismut.

Da die Genauigkeit des erhaltenen A—K. direkt von der Genauigkeit der Wägung abhängt, so suchte ich die Wage hervorragend empfindlich zu machen, indem ich den Drahtquerschnitt des Senkdrahtes auf einen Neuntel des bis dahin gebrauchten reduzierte. Die erwartete Empfindlichkeit von 0,01 mg war aber innerhalb kaum eines halben Milligramms vorhanden, so dass sie illusorisch wurde, denn die zu messenden Gewichtsdifferenzen betrugen hier mehr als 0,01 g. Für dieses Intervall war die Empfindlichkeit höchstens ein Drittel mg, gegenüber 0,1 mg für das gleiche Intervall bei der vorher. Konstruktion, die theoretisch zehnmal weniger empfindlich ist. Wenn also diese Messungen infolgedessen nicht mehr hervorragend genau sind und auch keine bedeutenden Ergebnisse zeitigten, so ist doch diese Erkenntnis sehr wertvoll. Wir haben also bei der Konstruktion viel mehr auf optische Genauigkeit Gewicht zu legen, als auf Steigerung der Empfindlichkeit durch Verkleinerung des Drahtquerschnittes!

Trotz der relativen Unempfindlichkeit des gegenwärtigen Modells wurde die Untersuchung durchgeführt. Es zeigte sich dabei mindestens die grosse Schnelligkeit der Methode. In zwei Minuten für jeden Fall war die eigentliche Messung des A.—K. erledigt.

Ich verfuhr so, dass ein zirka 0,75 cm^3 grosses Stück des Metalls, in Wasser von Zimmertemperatur gehängt, an der Wage austariert wurde.

Die Stellung wurde abgelesen, rasch das kalte Wasser durch heisses ersetzt und wieder abgelesen.

Bestimmt wurden ferner die Temperaturen des kalten und warmen Wassers, sowie das Volumen des Metallstückes auf 0,01 cm genau.

Diese Volumenmessung wurde auf folgende Weise durchgeführt.

Ein mit einer Marke versehenes enges Gefäss wird bis zu dieser Marke mit einer Bürette ausgemessen, dann entleert man, trocknet aus, gibt das zu messende Stück hinein und lässt wieder Wasser aus der Bürette bis zur Marke einlaufen. Die Differenz der beiden Flüssigkeitsmengen ist gleich dem Volumen des Körpers.

Der lineare Ausdehnungskoeffizient β als ein Drittel vom kubischen angenommen, berechnet sich nach folgender Formel

$$\beta = \frac{V_0 (s_0 - s_1) - G}{3 V_0 s_1 t}$$

G = Gewichtsdifferenz (an der Wage abgelesen)
V_0 = Volumen des Metallstückes bei t_0
s_0 = Dichte des Wassers bei t_0 } aus Tabellen zu
s_1 = „ „ „ bei t_1 } ersehen.
$t = t_1 - t_0$ = Temperaturdifferenz.

Die erhaltenen Werte
für Zinn $\beta = 0{,}0000\,24$
für Wismut $\beta = 0{,}0000\,10$ differieren gegen die Werte (Landolt-Börnstein)
für Zinn $\beta = 0{,}0000\,2038$
für Wismut $\beta = 0{,}0000\,1227$ beträchtlich, doch werden diese Abweichungen durch die bestehende Unempfindlichkeit des gebrauchten Wagemodells hinlänglich erklärt.

Ausser dem Vorteil der Schnelligkeit für diese Messungen ist noch anzuführen die Möglichkeit der Verwendung kleiner Mengen Substanz, was bei kostbarem Material für die Ausführbarkeit der Untersuchungen oft ausschlaggebend ist.

Schlusswort.

Durch die vorliegende Arbeit wurde bis in die Einzelheiten hinein die Grundlage für eine neue Wage geschaffen, die innerhalb der analytischen Genauigkeit ein ausserordentlich schnelles Wägen gestattet.

Da aber der Nutzen der Arbeit erst hervortritt, wenn das neue Hilfsmittel durch Vermittlung der Fabrikation im Grossen der Allgemeinheit zugänglich geworden ist, so wird eine weitere Aufgabe sein, die Technik für die Sache zu interessieren, was vom Verfasser versucht werden wird.

Vita.

Ich, Karl Oskar Bornhauser, wurde geboren zu Basel am 20. Februar 1893 als Sohn des Lehrers Konrad Bornhauser, gest. 14. August 1916 und der Karoline Agnes, geb. Franz von Basel und Weinfelden.

Nach dem Besuch der Primarschule absolvierte ich die Realschule meiner Vaterstadt und erhielt daselbst im Herbst 1911 das Maturitätszeugnis, worauf ich die Basler Hochschule bezog.

Nach fünf Semestern akademischen Studiums trat ich als Doktorand in das physikalisch-chemische Laboratorium ein, wo, unter Anleitung durch Herrn Prof. Dr. A. L. Bernoulli, vorliegende Arbeit vom Mai 1914 bis Juni 1916 entstand.

In zwei akademischen Ferien war ich als Assistent der Schweiz. geodätischen Kommission tätig und erwarb mir dadurch wertvolle Kenntnisse über grosszügig durchgeführte Präzisionsmessungen.

Während meines Studiums besuchte ich die Vorlesungen der Herren Professoren:

A. L. Bernoulli, G. v. Bunge, Fr. Fichter, Aug. Hagenbach, C. Schmidt, H. Veillon, H. Rupe,

und die Uebungen der Herren Professoren

Fr. Fichter im anorg. Laboratorium,

H. Rupe im org. Laboratorium,

Aug. Hagenbach und H. Veillon im physikalischen Laboratorium.

A. L. Bernoulli im physikalisch-chem. Laboratorium.